

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra Robotiky

Soft robotika a její aplikace

Soft Robotics and its Applications

Student:

Adam Stehlík

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Zdenko Bobovský, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Stehlík**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2301R013 Robotika

Téma: **Soft robotika a její aplikace**
Soft Robotics and its Applications

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Soft robotika.
2. Základní rozdělení.
3. Aplikační využití.
4. Oblasti vývoje.
5. Soft robotika na Scopus.
6. Soft robotika na Web of Science.
7. Vhodné nové oblasti pro vývoj a aplikaci soft robotiky.
8. Práci též doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD.

Seznam doporučené odborné literatury:

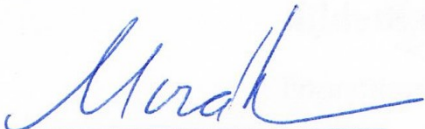
1. Scopus. Dostupné z: <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic>
2. Web of Science. Web of Science Core Collection Basic Search. Web of Knowledge. Dostupné z: <https://www.webofscience.com>
3. Soft Robotics. Transferring Theory to Application. ISBN 978-3-662-44506-8. [online]. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-44506-8>
4. Soft Robotics Toolkit. Soft Robotics Toolkit [online]. Copyright © 2018 The President and Fellows of Harvard College. Dostupné z: <https://softroboticstoolkit.com/home>
5. Softrobotics. Robotic systems with smart materials that unlock automation for all markets. [online]. Dostupné z: <https://www.softroboticsinc.com/>
6. Cornell Paul. Excel as Your Database. ISBN: 978-1590597514
7. Creating Your First Database - Access 2013: The Missing Manual [Book]. O'Reilly Media - Technology and Business Training [online]. Copyright © 2018 Safari Books Online. Dostupné z: <https://www.oreilly.com/library/view/access-2013-the/9781449359447/ch01.html>
8. Base | LibreOffice - Free Office Suite - Fun Project - Fantastic People. Home | LibreOffice - Free Office Suite - Fun Project - Fantastic People [online]. Dostupné z: <https://www.libreoffice.org/discover/base/>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdenko Bobovský, PhD.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

STEHLÍK, A. *Soft robotika a její aplikace: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky, 2019. Vedoucí práce: Bobovský, Z.

Bakalářská práce se zabývá tématem Soft robotiky a jeho rozdělením do základních kategorií. První část práce je věnována základním informacím o této problematice, inspiracím, historii a institucím, které se touto problematikou zabývají. Následuje rozdělení Soft robotiky do kategorií. Závěr práce se věnuje současnému stavu a dalším oblastem vývoje.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS


STEHLÍK, A. *Soft Robotics and its Applications: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2019. Thesis head: Bobovský, Z.

Bachelor thesis deals with the topic of Soft robotics its distribution into individual categories. The first part of the thesis is dedicated basic information about this issue, inspirations, history and institutions which are interested in this topic. Next follows the division of Soft robotics into categories. Last part of the thesis is devoted to the current state of Soft robotics and areas of development in this field.

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, же Высoкá škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona. Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, же odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.05.2019


.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Adam Stehlík

Adresa trvalého pobytu autora práce: Hasičská 1133, Šenov, 739 34

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.05.2019



.....
podpis studenta

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Zdenku Bobovskému Ph.D. za cenné rady a připomínky při konzultacích.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Základní seznámení s problematikou.....	11
2.1	Inspirace přírodou	12
2.2	Historie.....	13
2.3	Univerzity a laboratoře	15
3	Základní rozdělení pohonů.....	17
3.1	Měkké pneumatické pohony	17
3.1.1	Materiály.....	19
3.1.2	Výroba	20
3.2	Dielektrické elektroaktivní polymery	20
3.3	Granular jamming	22
3.4	Pohony požívající materiály s tvarovou pamětí.....	24
3.5	Speciální typy pohonů	25
3.5.1	Robot navigující se prostředím skrze růst	25
3.5.2	Roboti ovládaní magnetickým polem.....	27
4	Ohebná elektronika.....	30
4.1	Změna geometrie současných elektrických součástí	30
4.2	Kapalné kovy	32
5	Aplikační využití.....	34
5.1	Výhody oproti pevným robotům.....	34
5.2	Komerční řešení Soft robotů a měkkých efektorů	36
6	Oblasti vývoje	38
6.1	Pneumatika a hydraulika.....	38
6.2	Chemie a studium materiálů	39
6.3	Mechanika a simulace.....	39
6.4	Robotika.....	40
7	Internetové databáze.....	41

7.1	Web of Science	41
7.2	Scopus	42
8	Nové oblasti pro vývoj a aplikaci Soft robotiky	44
8.1	Soft robotické klouby.....	44
8.2	Soft robotické křídlo	46
9	Závěr.....	48
	Seznam použitých pramenů	49
	Seznam příloh	55

1 Úvod

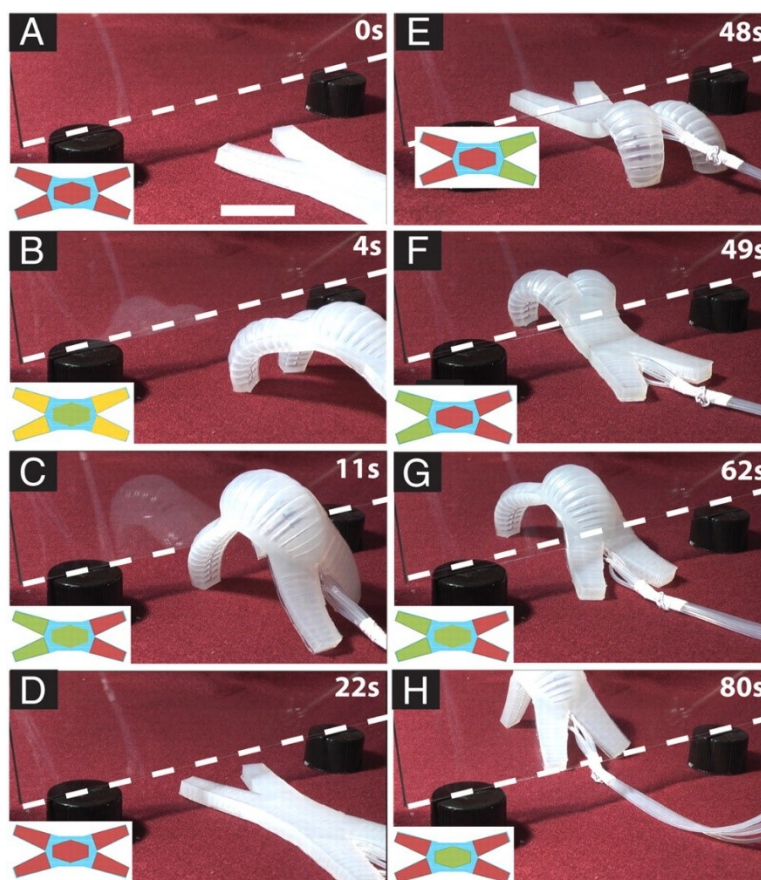
V současné době se zvyšuje zájem o nové odvětví Soft robotiky. Tato část robotiky se zabývá konstrukcí robotů a jejich komponenty z měkkých a poddajných materiálů. Nahrazením pevných částí za měkké získávají roboty nové vlastnosti, mezi které patří schopnost přizpůsobit se prostředí nebo manipulace s objekty komplikovaných tvarů efektně s měkkými úchopnými částmi.

První část práce se zabývá rozdělením pohonů pro Soft roboty a popisem funkčních principů těchto typů pohonů. Dále jsou popsány nové typy elektroniky, které musí být schopny změnit svůj tvar zároveň s měkkými částmi robotu. Druhá část práce se věnuje výhodám Soft robotů oproti pevným robotům a jejich dostupnému praktickému využití s ohledem na tyto výhodné vlastnosti. Třetí část práce se zabývá oblastmi vývoje jednotlivých problematik tohoto tématu a novými možnostmi aplikačního využití Soft robotů.

2 Základní seznámení s problematikou

I když většina robotických systému dnešní doby je vyrobena z pevných částí jako je železo a hliník, převážná biologických mechanismů kolem nás je málokdy složena převážně z pevných komponentů a obvykle používají měkké, pružné a ohebné materiály pro přežití a přizpůsobení se prostředí kolem nich.[1] Soft robotika se tedy věnuje robotům zkonstruovaných převážně z poddajných a měkkých materiálů či zcela měkkým robotům bez pevných částí.

I když konvekční pevní roboti v posledních desetiletích udělali obrovský pokrok, ve vývoji mají stále mnoho limitací. Samotný materiál pevných robotů, který jim dovoluje zvedat velmi těžká tělesa s vysokou přesností a rychlostí, je dělá velmi těžkými a drahými. Nepoddajní pevní roboti mají problém se přizpůsobit prostředí a tělesům, se kterými manipulují. Soft roboti tedy mohou najít své využití v prostředích a odvětvích, tam kde nepoddajní roboti selhávají. Soft robot viz. Obr.1 má schopnost komplexního pohybu bez použití jakýchkoli kloubů a pevných částí a celý subsystém pohybu je složen pouze z jedné části.



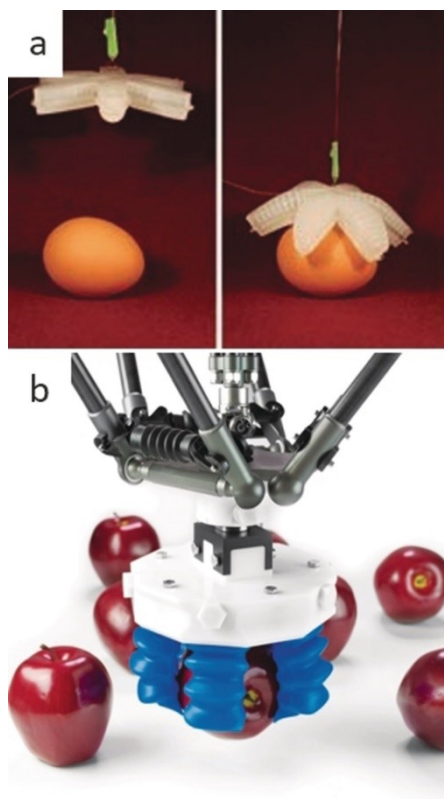
Obr.1 - Pohyb Soft robotu pod překážkou

Zdroj: Robert F. Shepherd et al. PNAS 2011;108:51:20400-20403

2.1 Inspirace přírodou

Inspirací přírodou není myšleno navrhnout přesnou kopii tvora, ale inspirovat se jeho schopnostmi a mimikovat jeho vlastnosti. Poté převzít tyto vlastnosti zjednodušeně a nejspíše pomocí jiného mechanismu. Pro mimikování funkce dané funkci nemusíme plně rozumět, ale stačí se inspirovat jejím principem. [3] Například tedy pokud chceme zkopírovat chapadlo chobotnice, nemusíme chapadlo zkoumat na molekulární úrovni, ale jen vzít jeho funkčnost a vytvořit ji pomocí jiného mechanismu.

Jak už bylo zmíněno (viz. kapitola 4), inspiraci pro Soft roboty si bereme z přírody kolem nás. Jedny z prvních zvířat, podle kterých byly Soft roboti vytvářeni, jsou červi, kteří nemají vnitřní kostru, a přesto jsou schopni velice sofistikovaných pohybů. Podle mořské hvězdice bylo vytvořeno první chapadlo viz. Obr.2.[2]



Obr.2 - a) První verze chapadla b) Moderní verze chapadla

Zdroj: Angew. Chem. Int. Ed., Volume: 57, Issue: 16, Pages: 4258-4273, First published: 08 March 2018, DOI: (10.1002/anie.201800907)

2.2 Historie

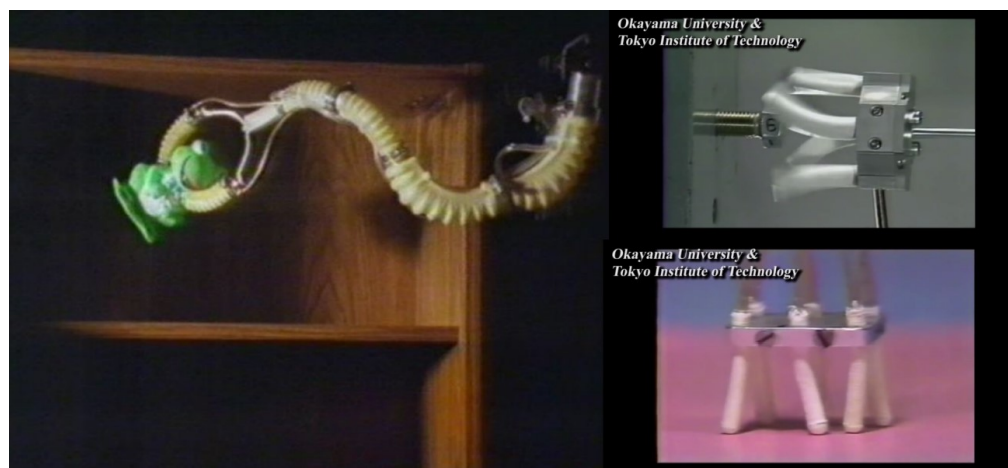
Použití měkkých materiálů k výrobě měkkých mechanismů se datuje až k roku 1950 v podobě McKibbenova pneumatického svalu viz. Obr.3, který sloužil jako lineární motor. Skládá se z pravidla z dvouplášťové válcové struktury, kde vnitřní vrstva je pružná a nepropustná a vnější vrstva je bifilárně spirálovitě splétaná z pevných vláken (např. nylonových) a válec je na koncích pomocí spon zatěsněn.[4] Po vystavení tlaku se tento sval zatáhne a vyznačuje se mimořádně vysokým poměrem síly a výkonu ku hmotnosti a objemu. Po vystavení tlaku se dokáže stáhnout až o 75 % své původní délky.[5]



Obr.3 McKibbenův sval (vrchní sval pod tlakem a spodní v uvolněné poloze)

Zdroj: [online] Dostupné z: http://www.act.sys.okayama-u.ac.jp/kouseigaku/research/2009/system/spreader/research_e.html

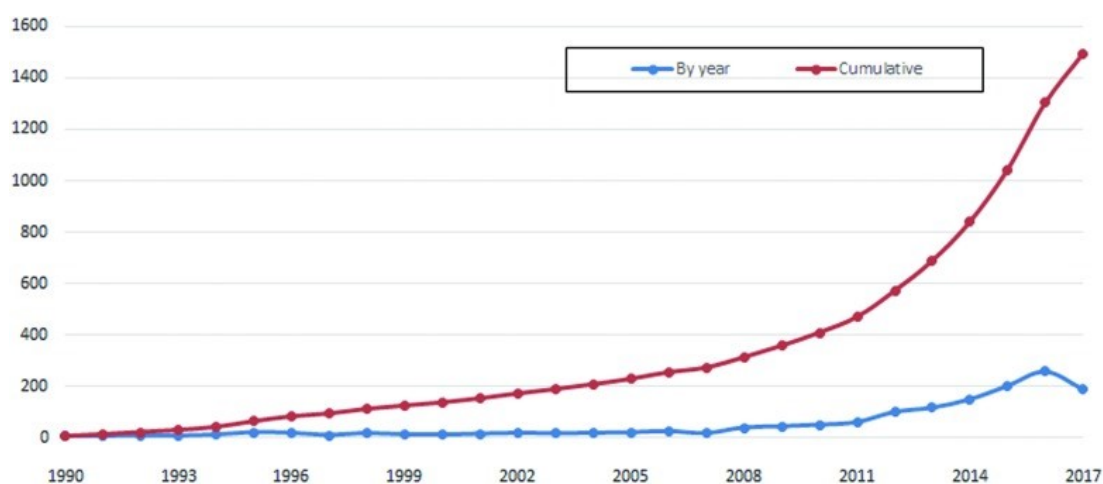
První publikované články o použití elastomerů pro kontinuálně se deformující tělo byly vydány v roce 1984 (prof. James F. Wilson) a v roce 1989 (prof. James F. Wilson a prof. U. Mahajan). Tito profesori společně vytvořili robotický manipulátor s pneumatickými komorami řazenými sériově, které po vystavení tlaku vzduchu měnily svůj tvar (viz. Obr.4). [6] Další robot pracující na podobném principu byl uveřejněn v článku prof. Koichi Suzumoriho v roce 1991. Tento robot se skládá z chapadla se třemi, nebo čtyřmi prsty, kde v každém prstu se nachází 3 měchýře, které umožňují pohyb jednotlivých prstů ve více stupních volnosti a robot je díky tomu schopen nejen manipulace s objekty, ale i pohybu (viz. Obr.4). [6]



Obr.4 Vlevo robotický manipulátor prof. J.F. Wilsona, vpravo roboti prof. Koichi Suzumoriho

Zdroj: *Liyu Wang; Surya G. Nurzaman; Fumiya Iida, "Soft-Material Robotics," in Soft-Material Robotics , , now, 2017, pp.*

V posledních letech vidíme velký zájem o téma Soft robotiky z několika důvodů. Prvním je vývoj v oblasti materiálů a chemie (zejména materiálů pod názvem elastomery). Dalším důvodem je dostatečně pokročilý výpočetní možnosti pro simulace takto složitých kontinuálních robotů. A v neposlední řadě díky rozsáhlému vývoji v pevné robotice máme rozsáhlejší informace o fungování robotických systému, ale také vidíme nedostatky, které by mohla Soft robotika vyřešit. Rostoucí zájem o téma Soft robotiky můžeme vidět na Obr.5, kde je zobrazen počet vydaných článků a kolem roku 2011 lze vidět vysoký nárůst, což naznačuje rostoucí zájem o toto téma.



Obr.5 Graf s počtem vydaných článků k tématu Soft robotika (modrá křivka vyjadřuje počet článků za rok a červená celkový počet článků)

Zdroj: *Soft Robot. 2018 Jun 1; 5(3): 229–241. Published online 2018 Jun 1. doi: 10.1089/soro.2017.0135*

2.3 Univerzity a laboratoře

Tab.1 ukazuje 20 institucí s největším počtem článků týkajících se tématu Soft robotiky. Z tabulky lze vidět, že *Univerzita Harvard* má největší počet článků, poté následuje *Scuola Superiore Sant'Anna* a *Chinese Academy of Sciences*. Tabulka také obsahuje počet citací článků dané instituce – dá se tedy předpokládat, že nejvíce relevantních článků mají Univerzita Harvard a MIT, které mají největší počet citací. Rozdíl oproti ostatním institucím je značný s další univerzitou se liší přibližně o 1000 citací. Převládající zemí, ze které instituce pocházejí, jsou Spojené státy americké, poté jsou Čína a Itálie.

Pozice	Institute	Počet článků	Počet citování	Země
1	Harvard University	65	2803	USA
2	Scuola Superiore Sant'Anna	48	906	Itálie
3	Chinese Academy of Sciences	43	300	Čína
4	Massachusetts Institute of Technology	42	1712	USA
5	Istituto Italiano di Tecnologia	40	692	Itálie
6	Carnegie Mellon University	37	539	USA
7	University of California System	33	715	USA
8	Centre National de la Recherche Scientifique	32	425	Francie
9	Sun Yat Sen University	29	281	Čína
10	University of Auckland	25	192	Nový Zéland
11	Seoul National University	24	319	Jižní Korea
12	National University of Singapore	20	107	Singapur
13	Beihang University	19	118	Čína
14	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne	19	353	Švýcarsko
15	University of Wollongong	19	163	Austrálie
16	Tsinghua University	17	143	Čína
17	Swiss Federal Institute of Technology Zurich	17	188	Švýcarsko
18	University of Michigan	16	404	USA
19	Cornell University	16	354	USA
20	Nanyang Technological University	16	368	Singapur

Tab.1 Institute s nejvíce publikacemi během let 1990-2017

Zdroj: Bao, Guanjin & Fang, Hui & Chen, Lingfeng & Wan, Yuehua & Xu, Fang & Yang, Qinghua & Zhang, Libin. (2018). *Soft Robotics: Academic Insights and Perspectives Through Bibliometric Analysis. Soft Robotics. 5. 10.1089/soro.2017.0135.*

Institute s největším počtem článků, tedy Univerzita Harvard, má laboratoř s názvem *Harvard Biodesign Lab* - pod vedením prof. George M. Whitesidese je zaměřena na vývoj Soft robotů ze stránky chemie a výzkumu vhodných materiálů.[7] Skupina prof. Whitesidese se poprvé začala zajímat o téma Soft robotiky v 90. letech, kdy dělala výzkum pro americké ministerstvo obrany (DARPA), která chtěla vytvořit robota, který by vypadal jako plechová láhev, zároveň se dokázal smrštit a byl schopný se proplazit pod dveřmi a zpět změnit svůj tvar v plechovou láhev. Na konci této spolupráce sice nevznikl fungující prototyp, ale vzniklo několik komponentů pro fungování Soft robotů jako pneumatická metoda pro pohyb robotů nebo metoda pro změnu tuhosti komponenty zvaná „granular jamming“.[2]

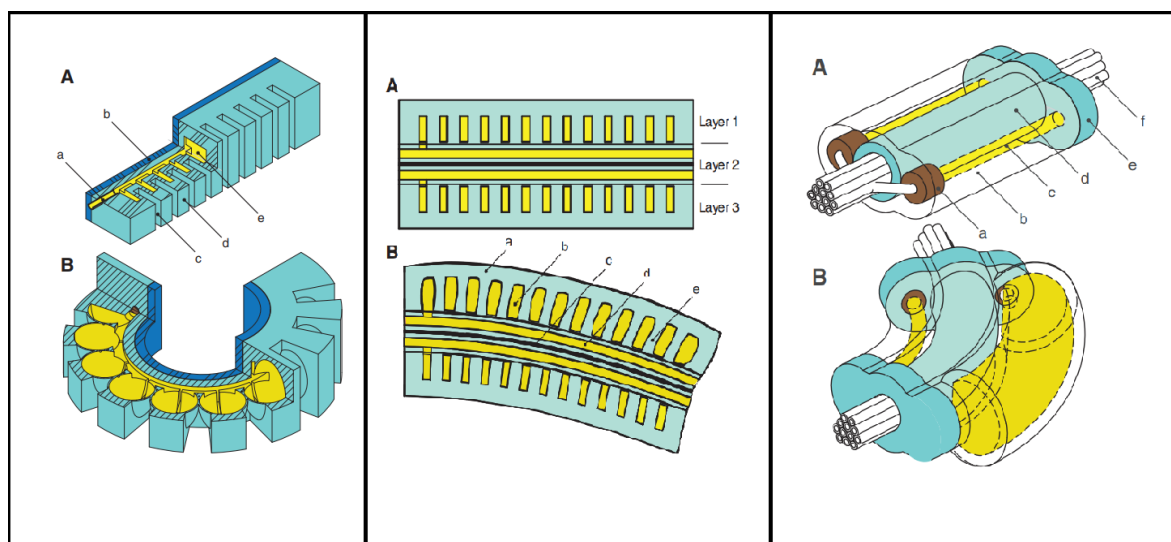
3 Základní rozdělení pohonů

V této kapitole se budu věnovat typům Soft robotů a jejich částí. Převážně různým technologiím a typům pohonů, které by těmto robotům dovolovaly se pohybovat v prostředí nebo s ním manipulovat.

3.1 Měkké pneumatické pohony

Měkké pneumatické pohony (dále SPAs z anglického: soft pneumatic actuator) jsou běžně tenkostěnné konstrukce z poddajných materiálů s různým počtem dutin z jedné strany opatřené omezující vrstvou méně poddajného materiálů, které po vystavení pozitivního tlaku do dutin produkují pohyb. Tento pohyb může být lineární, ohyb, rotace nebo kombinace předchozích podle umístění dutin a umístění omezující vrstvy.[8]

Na Obr.6 lze vidět tři způsoby uspořádání dutin znázorněné žlutou barvou. Na každém z příkladů lze vidět poloha před a po vystavení tlaku a změny v pohybu těchto pohonů. První konstrukce je z hlediska jednoduchosti nejvýhodnější a také má možnost největšího ohybu.

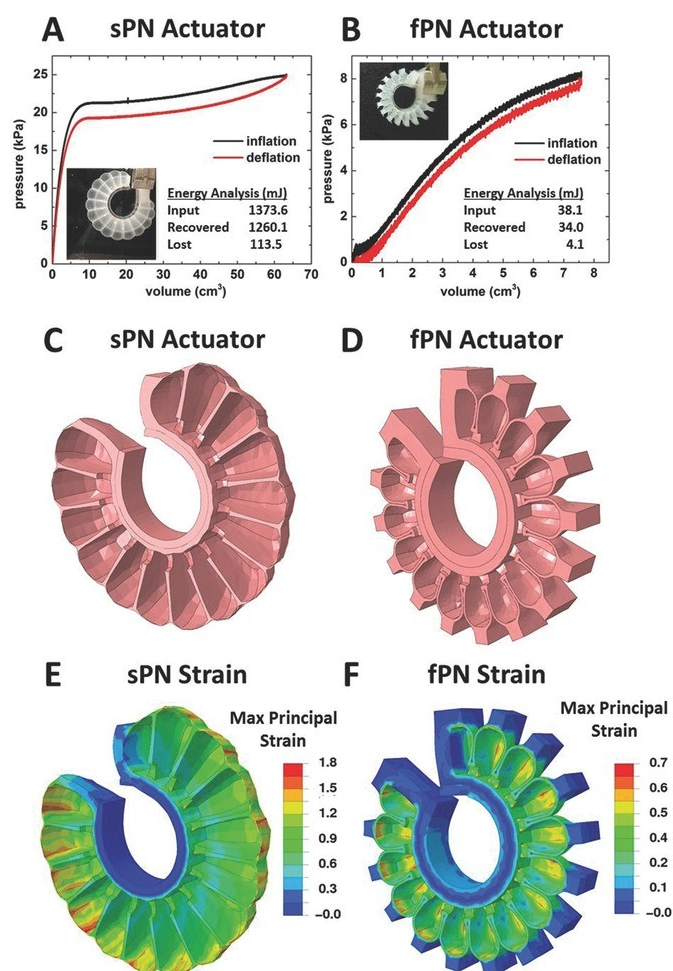


Obr.6 Tři typy konstrukcí měkkých pneumatických pohonů

Zdroj: [online] Dostupné z:

<http://europepmc.org/backend/ptpmcrender.fcgi?accid=PMC4997626&blobtype=pdf>

Jednou z důležitých vlastností těchto pohonů je rychlost pohybu, která závisí nejen na tvaru celého zařízení, ale na počtu, rozmístění a velikosti komor. Na Obr.7 lze vidět 2 různé návrhy pohonu. První označován jako sPN – pomalý pneumatický pohon a druhý jako fPN – rychlý pneumatický pohon. Objem fPN je mnohokrát menší, a tedy je plně nafouknut rychleji s rychlostí nafouknutí 1m.s^{-1} (měřeno na špičce pohonu). Na grafech A, B v obrázku lze vidět rozdílná křivka poměru tlaku a objemu.[9]

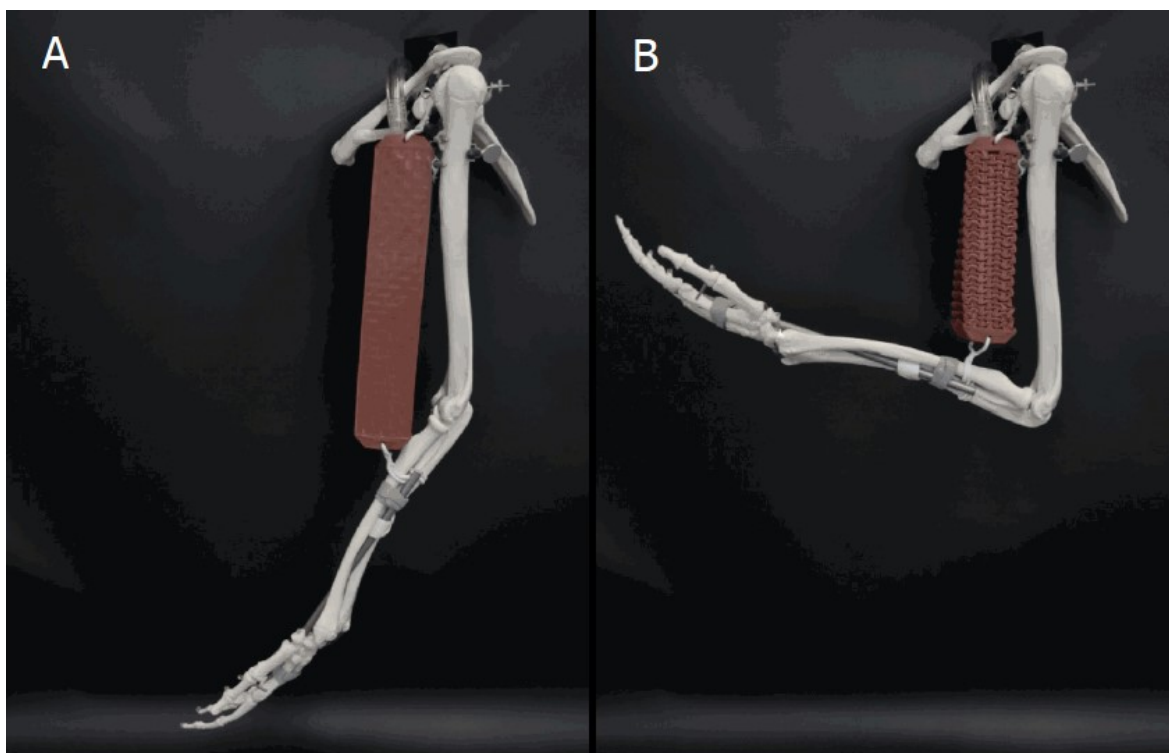


Obr.7 Modely dvou rozdílných pneumatických pohonů s grafy poměru tlaku a objemu

Zdroj: [online]. Dostupné z:

[online]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adfm.201303288>

Další metodou pro pohyb těchto pohonů je místo pozitivního tlaku aplikování vakua do dutých komor pohonu. V tomto případě využíváme vzpěru, který je v pevné robotice nepříznivý, ale zde je příznivý a dovoluje pohonu se pohybovat. Na Obr.8 lze vidět příklad takového pohonu, který je použit jako náhrada pažního svalu.



Obr. 8 Pneumatický pohon založen na vakuu v klidném stavu (A) a ve stavu po přívodu vakua (B)

Zdroj: [online]. Dostupné z: <https://wyss.harvard.edu/actuators-inspired-by-muscle/>

3.1.1 Materiály

SPAs jsou převážně složeny z materiálů, které mají Youngův modul přirovnatelný k biologickým materiálům jako svaly a kůže tedy okolo 1GPa. Z tohoto důvodu se jako materiál pro SPAs používá silikon, guma nebo další elastomery.[8] Deformace a poddajnost těchto pohonů není dosažena jen vlastnostmi daných materiálů, ale i interakcí mezi dvěma typy materiálů (např. materiály s různou schopností ohybu).

I když mají měkké materiály mnoho výhod, jejich použití představuje několik problémů jako je nelineární chování při pohybu, což je problémem při simulaci takovýchto pohonů. Dalšími nežádoucími efekty při použití těchto materiálů je potřeba sebeopravy při poškození nebo únava materiálu při zatížení. Díky vzrůstajícímu zájmu o Soft robotiku vznikají nové materiály se schopností sebeopravy nebo schopností ladění teploty vzniklé pohybem, která má za následek únavu.[8]

3.1.2 Výroba

SPAs jsou vyráběny různými způsoby, kde jedním z nich je litografie. Tento proces má zpravidla tři kroky: Zprvu se dvě elastomerové vrstvy odlejí do formy (převážně vyrobená 3D tiskem) za pomoci tekuté silikonové gumy. Do formy, ve které se tvoří plochá vrstva je vložena vrstva, pevnějšího materiálu jako papír nebo plast, která vytvoří omezující vrstvu. V druhé části jsou elastomerové vrstvy po vytvrzení vyjmuty z forem a jejich společné plochy jsou namočené v tenké vrstvě nevytvrzeného elastomeru. V posledním kroku jsou tyto vrstvy spojeny a po vytvrzení jsou připraveny.[10] Tato metoda je nízkonákladová, a tedy je často využívána pro tvoření prototypů SPAs.

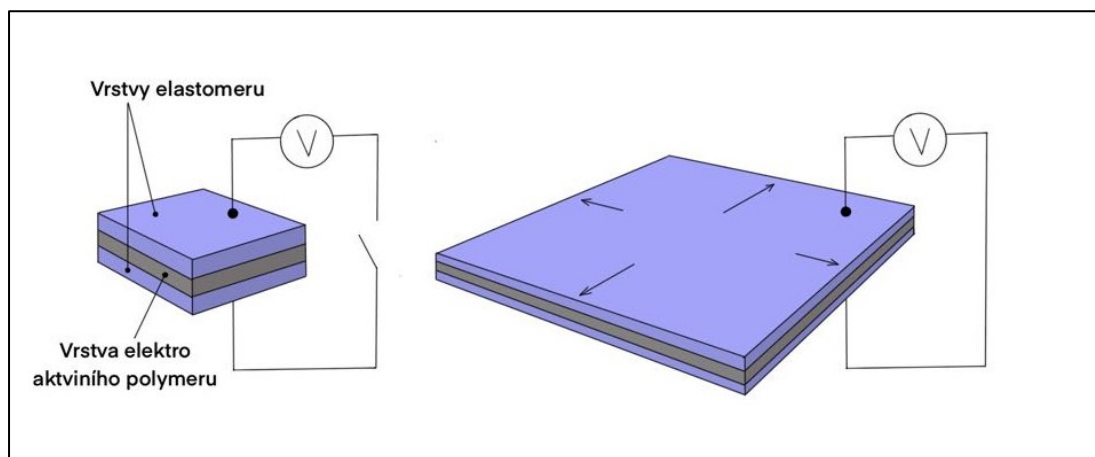
Další metodou je SDM (z angl. Shape deposition manufacturing). Tato metoda tvoří 3D objekty pokládáním vrstev materiálu objektu a vrstev podpůrného materiálu, který je později odebrán. Tato metoda dovoluje tvoření složitých geometrií a schopnosti vložení senzorů do objektů v průběhu výroby, které jsou díky tomuto postupu dokonale zakomponovány v systému.[8]

Metoda 3D tisku poddajných měkkých materiálů je rostoucím způsobem vytváření Soft robotů a především SPAs. Schopnost tisknout několik různých materiálů najednou do jednoho systému a tisk složitých geometrií je výhodou této metody. Ve srovnání s ostatními metodami jsou Soft roboty tisknuté touto metodou křehčí, což vychází z použitých materiálů a ze samotné technologie 3D tisku.[8]

3.2 Dielektrické elektroaktivní polymery

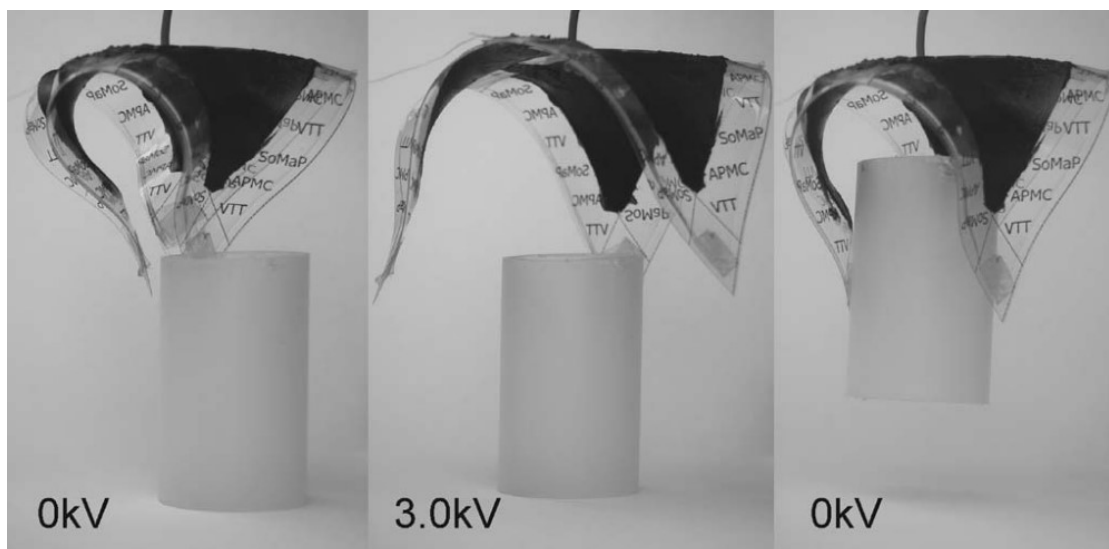
Elektroaktivní polymery (EAPs z angl. Electro Active Polymers) jsou rozděleny do dvou hlavních kategorií: iontové a elektronické. Elektrické pole nebo Coulombovy síly pohání elektronické EAPs, zatímco pohyb iontových EAPs je uskutečněn skrz rozptyl a mobilitu iontů. Elektronické EAPs obecně vyžadují vysoká elektrická pole ($>100 \text{ V}/\mu\text{m}$) a iontová vyžadují nízká napětí okolo 1-5 V.

Pomocí těchto EAPs jsou poté vytvořeny dielektrické elektroaktivní polymery (DEAPs z angl. Dielectric Electroactive Polymers), které se skládají z vrstvy EAPs uzavřené v tenkých vrstvách elastomeru (viz. Obr.9). Tyto DEAPs lze přirovnat k pružným kondenzátorům elektrody(elastomery) - jsou z poddajných materiálů, které jim dovolují měnit svůj tvar a po vystavení elektrickému poli opačně nabitě části vyvolají napětí v dielektrickém elastomeru a způsobí jeho roztáhnutí.[11]



Obr.9 Dielektrický elektroaktivní polymer bez a s přívodem napětí

Jedním z příkladů použití této technologie je vytvoření manipulátoru (viz. Obr.10), který byl vytvořen z DEAPs a předeptnut do uzavřeného stavu. Po vystavení napětí o velikosti 3 kV do struktury se jednotlivá chapadla manipulátoru otevřou a po odebrání proudu je manipulátor schopen uchytit objekt silou 7 mN. Výhodou manipulátoru je jeho nízká hmotnost a jednoduchá konstrukce.[12]



Obr.10 Manipulátor vytvořen z dielektrického elektroaktivního polymeru

Zdroj: Kofod, Guggi & Wirges, Werner & Paaanen, Mika & Bauer, Siegfried. (2007). *Energy minimization for self-organized structure formation and actuation. Applied Physics Letters*. 90. 081916 - 081916. 10.1063/1.2695785.

S EAPs souvisí také schopnost elektroadheze některých polymerů. Ta umožňuje po vygenerování elektrického pole v polymeru adhezi k objektu nezávisle na schopnosti materiálu vést elektrický proud.[13] Příkladem použití této technologie je dvou chapadlový manipulátor viz. Obr.11, který je schopen elektroadheze a ohybu způsobeného metodou popsanou výše (pomocí DEAPs). Síla stisku tohoto manipulátoru je 1 mN, což umožňuje manipulaci s velmi křehkými objekty a dále elektroadhezivní síla je rovna 3,5 N na 1cm², což umožňuje zvedání těžších objektů. Kombinace těchto dvou sil umožňuje manipulátoru vážícímu 1,5 g manipulovat s velmi křehkými objekty různých geometrií od neuvařeného vejce (60,9 g), listu papíru (0,8 g) a vodou naplněného nafukovacího balónu (35,6 g) s velmi nestálým tvarem.[14]



Obr.11 Manipulátor využívající elektro adhezi

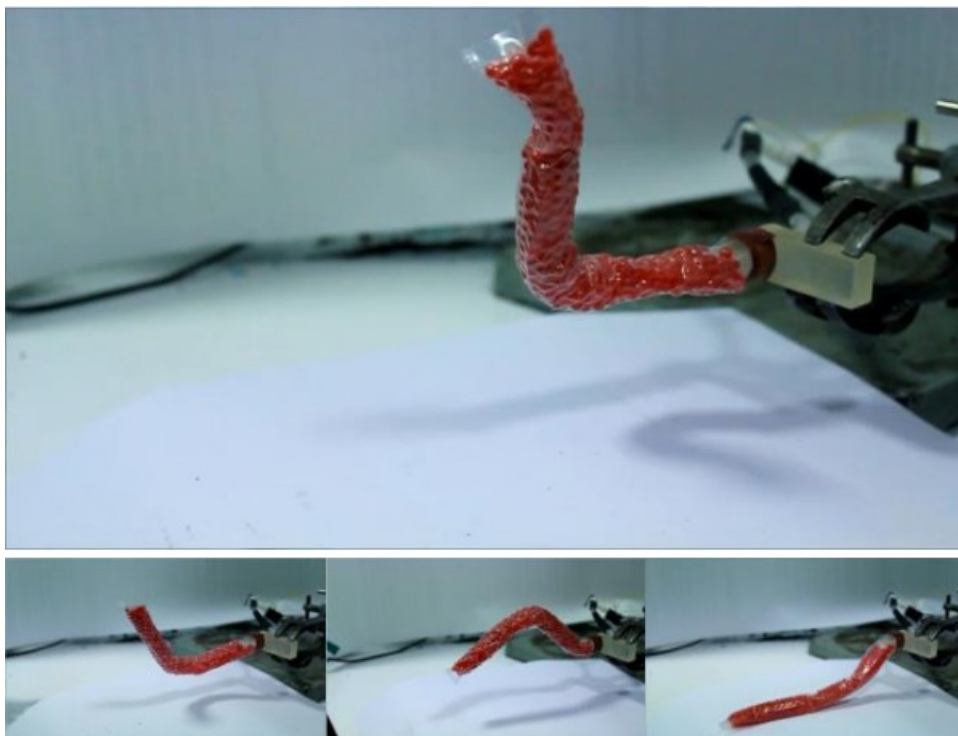
Zdroj: *Intrinsic electro-adhesion for soft DEA-based grippers – EPFL-LMTS. EPFL-LMTS – Soft Transducers Laboratory [online]. Copyright © EPFL 2019 [cit. 05.05.2019].*

Dostupné z: <https://lmts.epfl.ch/lmts-research/dea/electroadhesion/>

3.3 Granular jamming

I když schopnost Soft robotů být poddajný je jejich velkou výhodou, v některých případech je pevnost a udržení tvaru důležité. Granular jamming umožňuje měnit poddajnost struktury. Velké množství malých granulí uložených v membráně dělá danou strukturu poddajnou, ale po vystavení vakua do membrány se struktura mění na pevnou.[15]

Tato technologie byla využita při vyrobení hadovitého robota s proměnlivou tuhostí (viz. Obr.12). V pravém dolním rohu obrázku lze vidět robota ve svém nejvíce poddajném stavu a po vystavení vnějším silám a zavedení vakua do membrány si robot udrží svůj přizpůsobený tvar a jeho tuhost se zvýší. [16]



Obr.12 Robot ve tvaru hada s proměnlivou tuhostí

Zdroj: [online]. Copyright © [cit. 05.05.2019]. Dostupné z:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.717.5798&rep=rep1&type=pdf>

Dalším využitím této technologie je robotická koule schopná pohybu (viz. Obr.13). Koule se skládá z několika trojúhelníků schopných měnit svou tuhost a pneumatické dutiny, která je umístěna uprostřed robota. Pohyb koule je prováděn ztuhnutím všech trojúhelníků, kromě toho nacházejícího se na povrchu, po kterém se robot pohybuje. Po natlakování pneumatické dutiny robot změní svůj tvar v neztuhlé části, což způsobí pohyb. [16]



Obr. 13 Robot schopný pohybu pomocí technologie Granular jamming

Zdroj: [online]. Dostupné z:

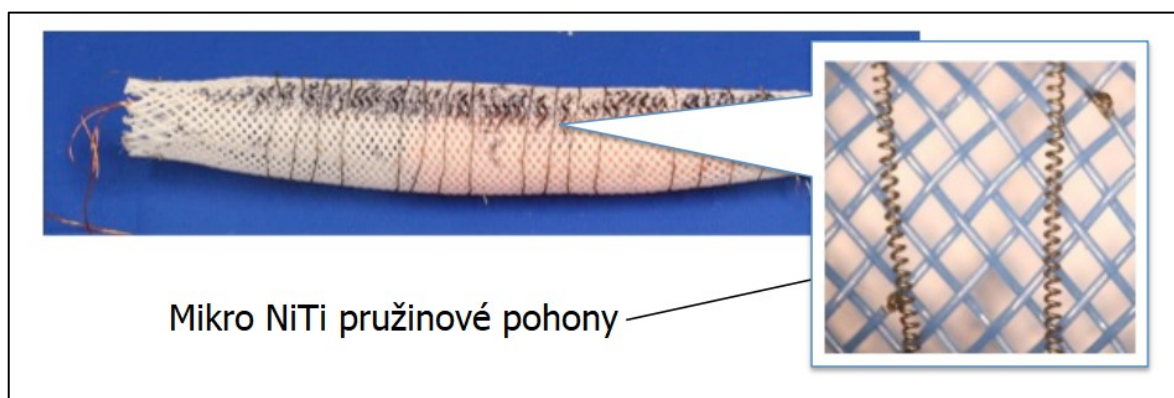
<https://jfi.uchicago.edu/~jaeger/group/JaegerGroupPapers/granular/JSEL%20Jamming%20Skin%20Enabled%20Locomotion.pdf>

3.4 Pohony požívající materiály s tvarovou pamětí

Materiály s tvarovou pamětí (SMA z angl. Shape memory alloy) jsou kovové slitiny, které se vrátí do původního tvaru po vystavení určité teplotě nebo změnám v namáhání. Takové to slitiny jsou NiTi, NiTiCu, CuAlNi, kde nejpoužívanější v Soft robotice je slitina Nitinol (NiTi). Nitinol je výhodný z hlediska schopnosti uchovat velké množství objemu energie v jednotce objemu. Naopak tento materiál má velmi nízkou účinnost, ale i přes to díky svým schopnostem uchování energie je používán zejména v malém měřítku, kde ostatní materiály zaostávají se svou schopností uchovat energii. [17]

V Soft robotice se SMA nepoužívají v rovném tvaru, který dosahuje deformací mezi 5-8 %, ale ve tvaru cívky, které mohou dosáhnout deformací více než 300 %. Pružiny jsou v těchto systémech vráceny do původního stavu vysokým proudem, což vytváří problém s chlazením, který může být vyřešen obklopením pružinového pohonu minerálním olejem, který není vodivý, ale dostatečně odvádí teplo. [18]

Příkladem využití technologie SMA za účelem pohonu je robot inspirovaný červem (viz. Obr.14). Červovití živočichové se pohybují prostorem peristalticky, tedy smršťováním těla a měněním svých třecích ploch. Smršťující pohyb je u tohoto robotu vertikální a po obvodu umístěnými cívkami z materiálu Nitinol, které zajišťují smrštění šířky a délky jednotlivých segmentů robota, které poté vyústí v pohyb. Rychlost tohoto vytvořeného robota je $3,47 \text{ mm.s}^{-1}$ s dodávaným proudem do cívek o velikosti 400mA. [19]



Obr. 14 Soft robot využívající SMA pro pohyb

Zdroj: *Peristaltic locomotion with antagonistic actuators in soft robotics [online].*

Copyright © [cit. 06.05.2019]. Dostupné

z: <https://groups.csail.mit.edu/drl/wiki/images/7/71/MeshwormFinal.pdf>

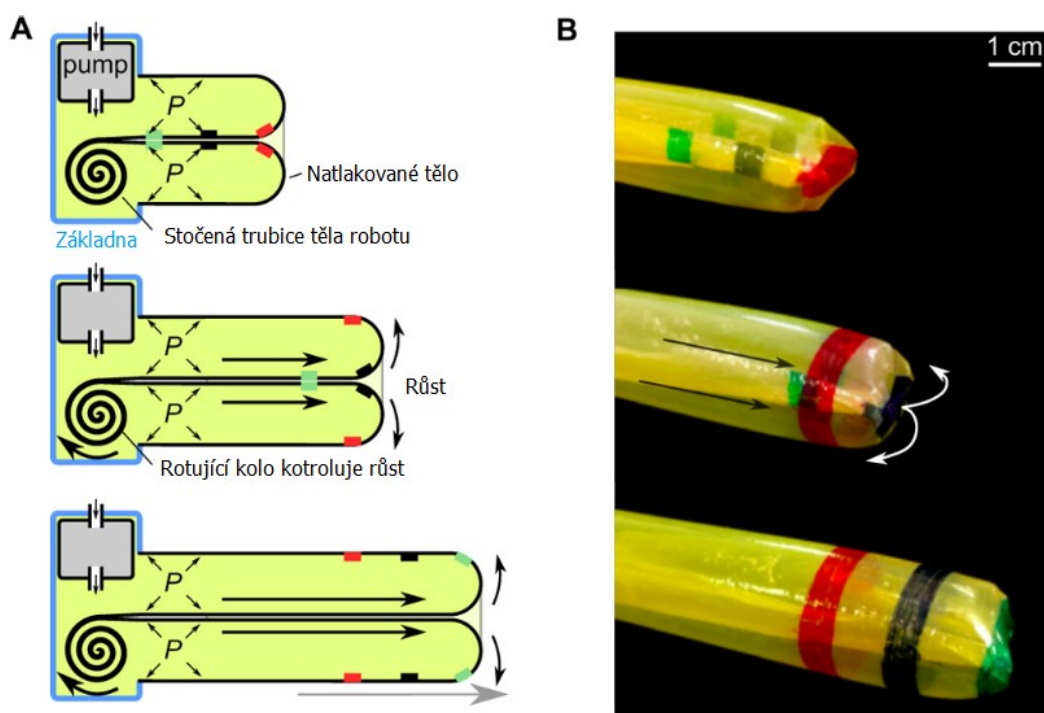
3.5 Speciální typy pohonů

Ve vývoji je několik robotů využívajících speciálních technologií pro orientaci v prostředí a svůj pohyb. V této kapitole projdu několik takovýchto řešení a jejich výhody oproti ostatním typům Soft robotů.

3.5.1 Robot navigující se prostředím skrze růst

Růst jako metoda pohybu v prostředí lze najít u vláken hub, rév, nebo u kořínku rostlin. Tyto organismy rostou ze svých konců a jsou schopny se několikanásobně prodloužit a obvykle je směr růstu ovlivněn receptory na organismu, které dovolují navigaci v prostředí. [20]

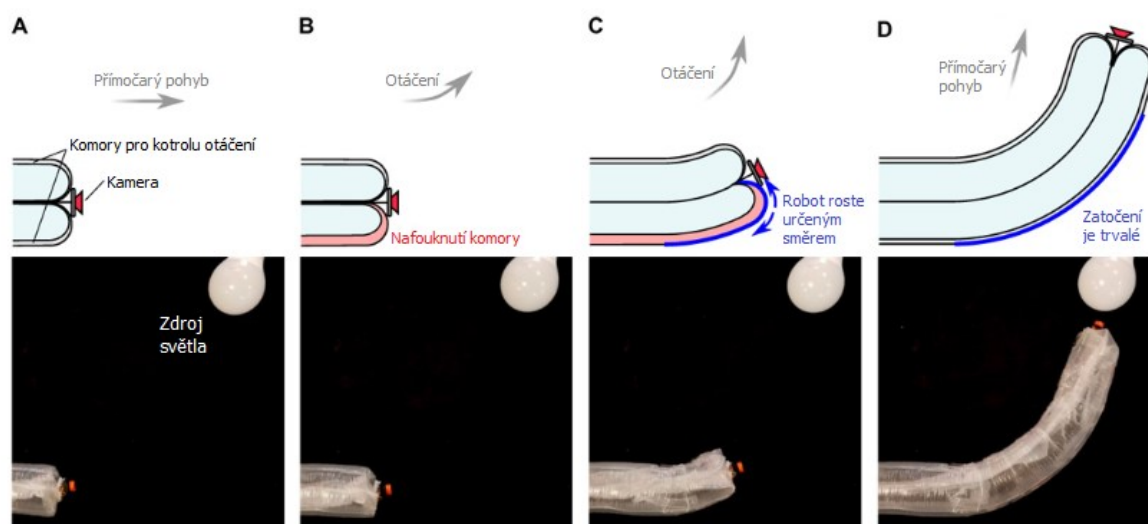
Na tomto principu je postaven prototyp robotu viz. Obr.15, na kterém můžeme vidět konstrukci takto rostoucího robota. Tenkostěnný tvar robota, který je smotán v základu, roste středem pomocí zvyšování tlaku v těle. Tento konkrétní robotický systém o délce 28 cm je schopen se roztáhnout do délky 72 m s rychlostí 10 m.s^{-1} . [20]



Obr.15 Rostoucí robot kontrolovaný tlakem

Zdroj: *A soft robot that navigates its environment through growth* | Science Robotics. Science Robotics [online]. Copyright © 2019 [cit. 07.05.2019]. Dostupné z: <https://robotics.sciencemag.org/content/2/8/eaan3028.full?ijkey=JxbjUARvBq6Hw&keytype=ref&siteid=robotics>

Pro orientaci v prostředí byly ze stran trubice přidány tenké komory, které po nafouknutí zvýší pevnost jedné strany robota, a dovolují robotu se otočit na požadovanou stranu. Takové otáčení je jednoduchou možností kontroly trajektorie s nevýhodou trvalosti každého zatočení vzhledem k neschopnosti robota navrátit se do předešlé polohy. Další úpravou bylo přidání kamery na špičku robota. Obě tato vylepšení dovolují robotu se autonomně orientovat v prostředí viz. Obr.16 za zdrojem světelného záření.



Obr.16 Rostoucí robot s autonomním pohybem k cíli

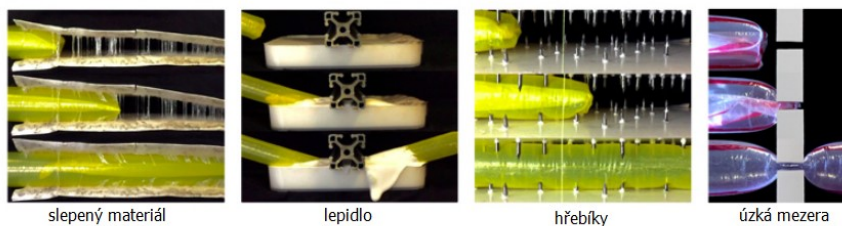
Zdroj: *A soft robot that navigates its environment through growth* | *Science*

Robotics. Science Robotics [online]. Copyright © 2019 [cit. 07.05.2019]. Dostupné

z: <https://robotics.sciencemag.org/content/2/8/eaan3028.full?ijkey=JxbjUARvBq6Hw&keytype=ref&siteid=robotics>

Takovýto robot je díky své možnosti přizpůsobit se prostředí a své velké poddajnosti schopen pohybu ve složitých prostředích o malých rozměrech. Tento tvar robota dovoluje přenášet v sobě materiály jako vodu (využití jako hasicí přístroj), kamery, senzory, železnou cívku pro vytvoření antény, nebo může sloužit jako efektor pro manipulaci v nedostupných prostorech. Využití takového rostoucího robota jsou zobrazena na Obr.17.[20]

A Růst skrz omezující prostředí



B Růst tvořící 3D struktury



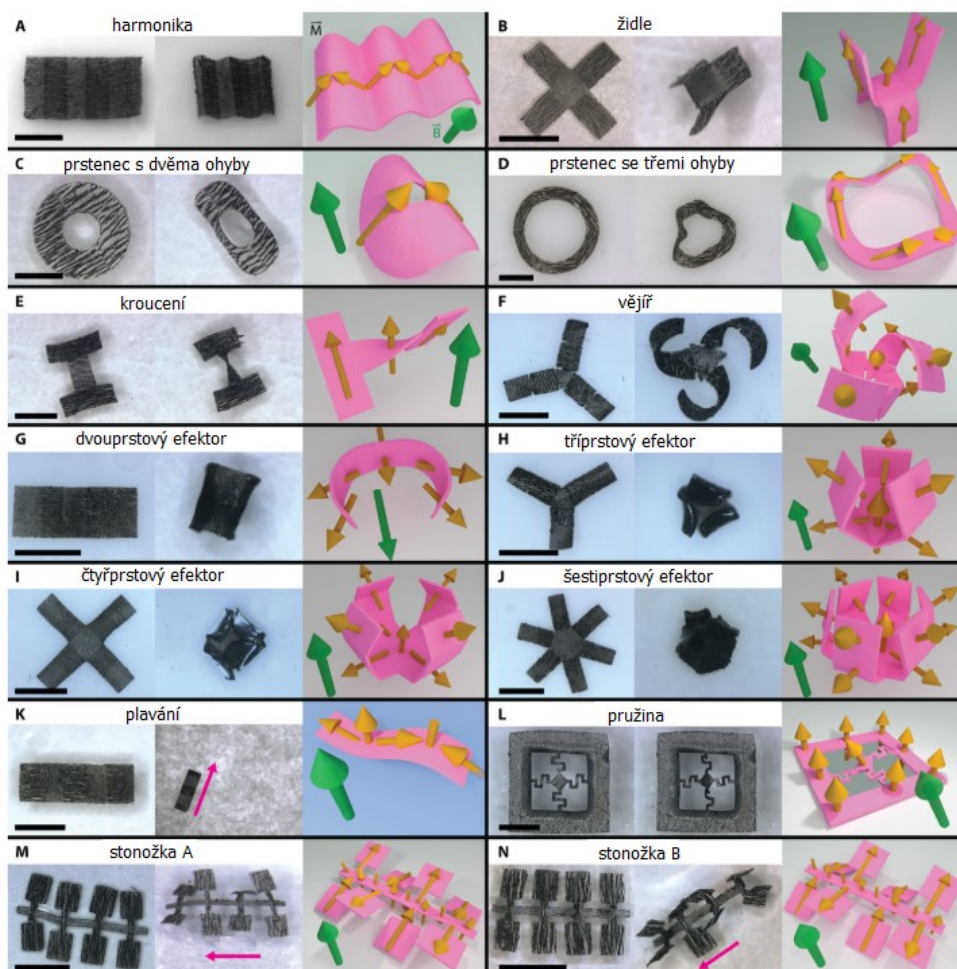
Obr.17 Využití rostoucího robota

Zdroj: *A soft robot that navigates its environment through growth* | *Science Robotics*. *Science Robotics* [online]. Copyright © 2019 [cit. 07.05.2019]. Dostupné z: <https://robotics.sciencemag.org/content/2/8/eaan3028.full?ijkey=JxbjUARvBq6Hw&keytype=ref&siteid=robotics>

3.5.2 Roboti ovládaní magnetickým polem

Tito roboti využívají přirozené vlastnosti feromagnetických materiálů měnit svoji orientaci podle elektromagnetického pole.

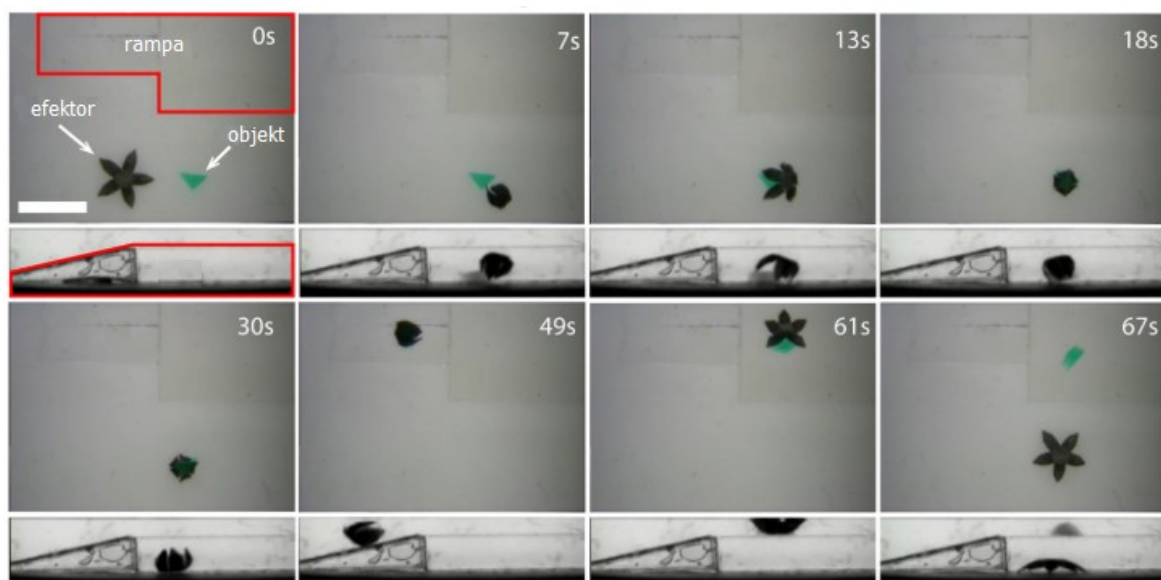
Tohoto principu využívají tito roboti. Mikročástice přirozené magnetických materiálů jsou vloženy do pryskyřice a všechny částice v dané oblasti jsou orientovány všemi póly ve stejném směru. Poté UV zářením je tato část pryskyřice zpevněna. V magnetickém poli se pak tato část robota chová stejně. Pohyb těchto robotů je zapříčiněn nastavením pólů různých částí robota odlišnými směry. Na Obr.18 můžeme vidět příklady pohybů, které v magnetickém poli mohou tito roboti provádět v závislosti na uspořádání magnetických pólů v robotu.[21]



Obr.18 Ukázky možností pohybů magnetických robotů

Zdroj: *Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions* | *Science Robotics*. *Science Robotics* [online]. Copyright © 2019 [cit. 07.05.2019]. Dostupné z: <https://robotics.sciencemag.org/content/4/29/eaav4494>

Ovládání těchto robotů je přesné a je bezdrátové. Tyhle dvě vlastnosti, plus jejich malá velikost, dává těmto robotům uplatnění například ve zdravotnictví, kde by mohly být používány pro sbírání vzorků z žaludku nebo jiných orgánů. Obr.19 ukazuje schopnost robota vzít materiál, pohybovat se s ním a doručit ho na požadované stanoviště.



Obr.19 Manipulátor ovládaný magnetickým polem

Zdroj: *Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions* | *Science Robotics*. *Science Robotics* [online]. Copyright © 2019 [cit. 07.05.2019]. Dostupné

z: <https://robotics.sciencemag.org/content/4/29/eaav4494>

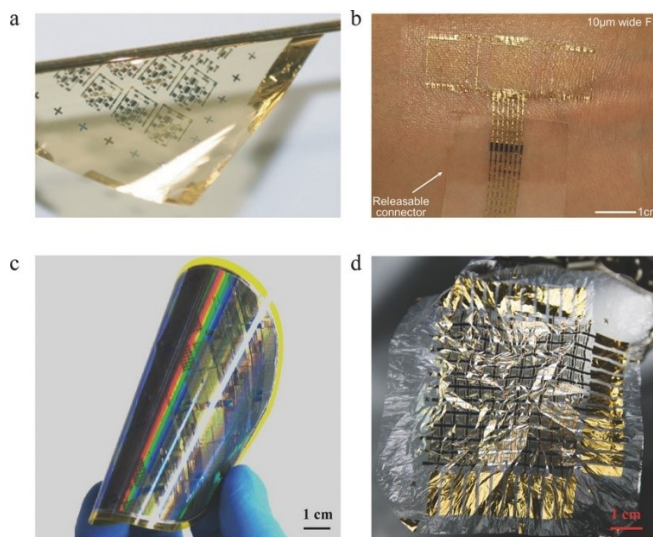
4 Ohebná elektronika

Pro aplikaci Soft robotů v praxi potřebujeme mít nejen způsob, jak pohybovat s měkkými těly Soft robotů, ale také potřebujeme tyto pohyby ovládat, dostávat data z okolí pomocí senzorů a mít zdroje energie, které se spolu s roboty a jejich komponenty budou ohýbat a budou spolehlivé i po mnoha nezmáhacích cyklech. V této kapitole rozvedu dva způsoby konstrukcí takovýchto komponentů a příklady takovýchto elektronických součástí.

4.1 Změna geometrie současných elektrických součástí

Materiály jako hliník, měď nebo silikon jsou v současné elektronice pevné, pokud jsou ale nanесeny tenké vrstvy těchto materiálů, mohou být ohýbány a složeny, ale ne natahovány, což je děla pro některá využití nevyhovující.[22]

Na Obr.20 můžeme vidět čtyři příklady ultratenkých elektronických obvodů. Na prvním obrázku (a) je vidět integrovaný elektrický obvod s organickými tranzistory na podpůrné vrstvě o tloušťce 12 μm s možností ohybu 100 μm bez poškození integrovaného obvodu. Tento obvod se svou elasticitou rovná té lidské tkáni, tedy je možnost tuto technologii využít pro přímé měření svalů, mozku nebo srdce na lidském těle. Obvod na obrázku b je spojen s pokožkou pomocí van der Walsových síly. Nejohebnější a nejlehčí je obvod na obrázku d vážící 3 gramy na metr a se šířkou 2 μm a schopností být zmačkaný jako list papíru.[23]



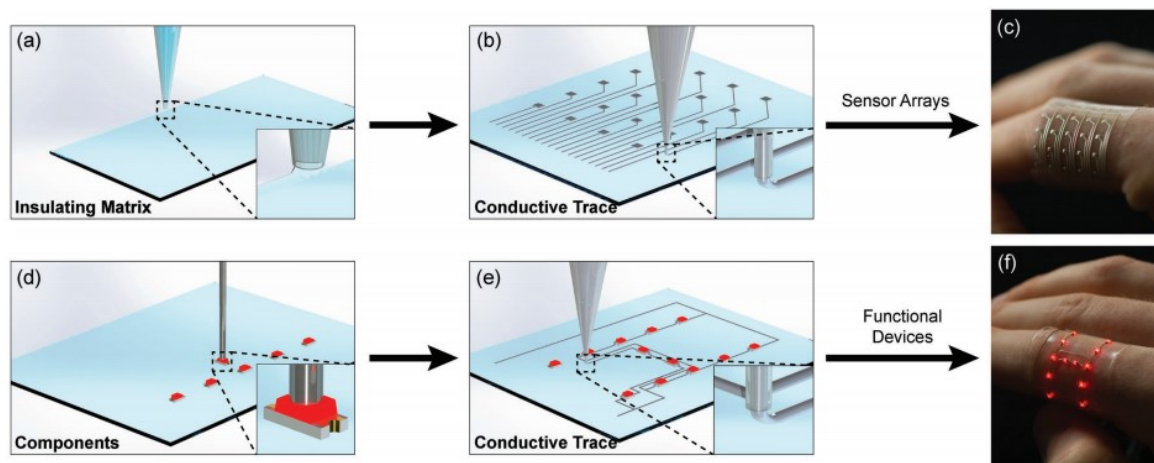
Obr.20 Příklady tenkých elektronických obvodů

Zdroj: *A Soft Future: From Robots and Sensor Skin to Energy Harvesters*[online].

Dostupné z:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.201303349#adma201303349-bib-0023>

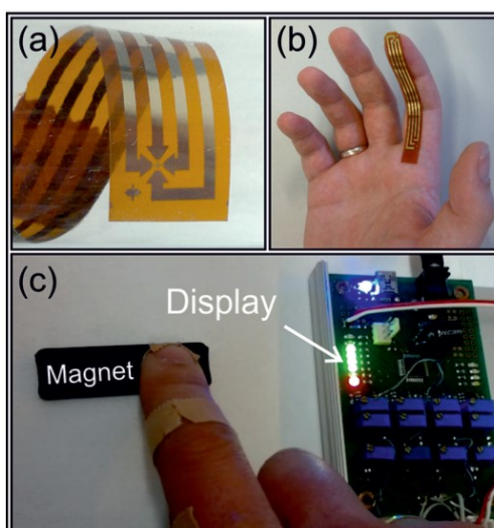
Takovéto elektronické prvky mohou být vyrobeny pomocí 3D tisku (viz. Obr.21). V horní části můžeme vidět tisknutý senzor. V první části je nanесena těsnící vrstva a poté vrstva vodivá. Ve spodní části lze vidět nanесení komponentů pomocí mikro vakuového efektoru, a poté nanесení vodivé vrstvy mezi nimi.[24]



Obr.21 Tisk elektronických součástí

Zdroj: *Hybrid 3D Printing of Soft Electronics [online]*. Dostupné z:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adma.201703817>

Konkrétní příklad měkkého senzoru je senzor magnetického pole na bázi Hallova jevu. Konvekční senzory na bázi polovodičů nejsou schopny požadovaného ohybu, proto nový způsob na bázi kombinace anorganické nanomembrány a polymerické fólie byl vyvinut pro vznik zcela ohebné Hallovy sondy (viz. Obr.22).[25]



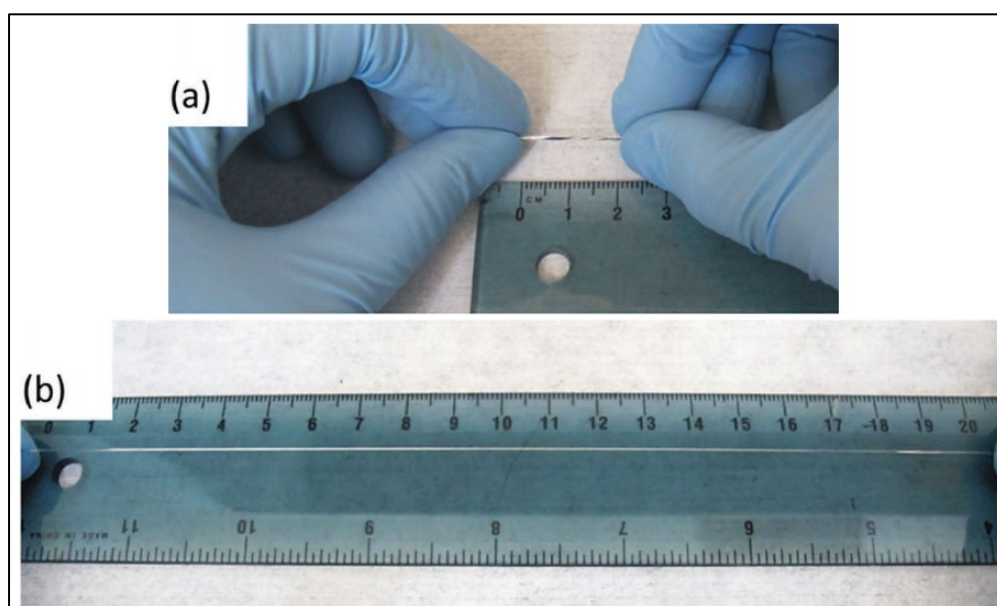
Obr.22 Ohebná Hallova sonda

Zdroj: *Shapeable magnetoelectronics [online]*. Dostupné z:
<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4938497>

4.2 Kapalné kovy

Kovy, které jsou kapalné, jsou jediným materiálem, který má při pokojové teplotě kapalné i vodivé vlastnosti. Nejznámějším zástupcem těchto kovů je rtuť, která je ale toxická. Dalším materiálem s těmito vlastnostmi je Galium a jeho slitiny, které mají stejné požadované vlastnosti jako rtuť, kromě její nebezpečné toxicity.

Pro účel vedení proudu musí být kapalné kovy uloženy v mikro kanálcích, které zamezí úniku kapaliny mimo požadované umístění. Takto vytvořené obvody mohou být flexibilní a oproti předchozí metodě také roztažné. Na Obr.23 se nachází vodič tvořený vnějším elastomerovým kanálkem a vyplněn kapalným kovem a je zde vidět jeho schopnost roztažení (až o 800 %).[26]

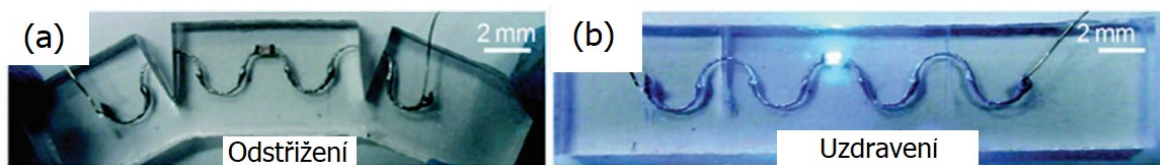


Obr.23 Vodič tvořen elastomerem a kapalným kovem

Zdroj: *Stretchable and Soft Electronics using Liquid Metals*[online]. Dostupné z:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201606425>

Další výhodnou vlastností tekutých kovů je schopnost sebeuzdravení při přerušení obvodu. Po např. rozstřížení volné vrstvy kovu oxidují a zabrání úniku. Po opětovném spojení rozstříženého obvodu se kov po vystavení elektrickému proudu opět spojí s plným navrácením předchozí funkčnosti. Tato schopnost je znázorněna na obvodu (viz. Obr.24), kde vodič z kapalného kovu opatřen LED diodou pro znázornění uzdravení je rozříznut a po opětovném spojení funkční. [26]

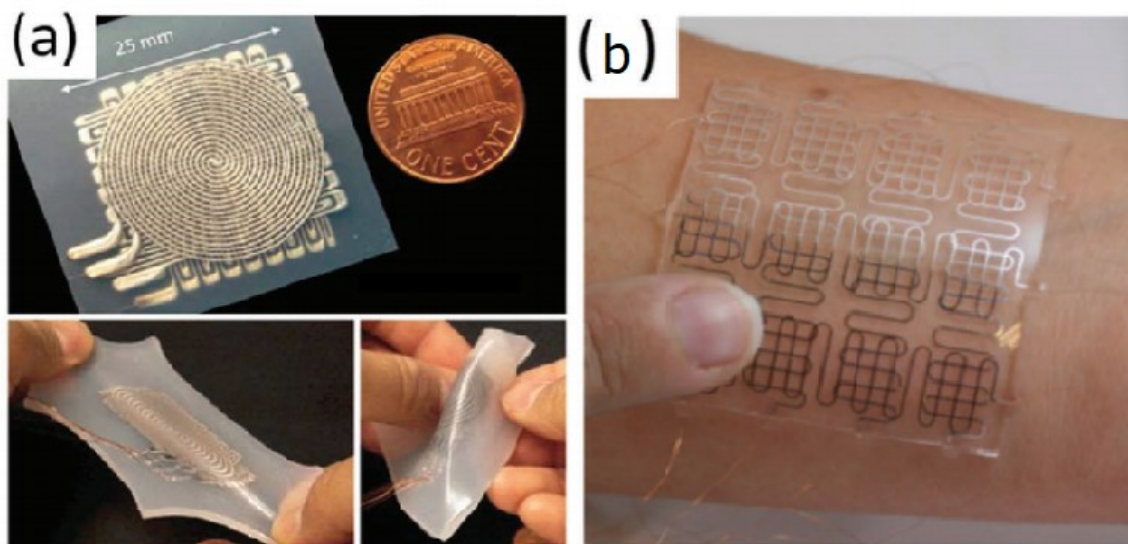


Obr.24 Sebeuzdravovací vlastnost tekutého kovu

Zdroj: *Stretchable and Soft Electronics using Liquid Metals*[online]. Dostupné z:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201606425>

Použití kapalných kovů nám dovoluje vytvořit plně měkké součásti pro skladování binární informace (0 nebo 1). Součást funguje jako Mermistor (elektronický prvek, který mění odpor v závislosti na proteklém elektrickém náboji).[27]

S kapalnými kovy lze také vytvořit senzor na měření zatížení. Tenké kanálky kovu se s napětím roztahují v délce a jejich průměr se zmenšuje, což má za následek snížení odporu, a tedy podle velikosti odporu můžeme měřit zatížení (viz. Obr.25a). Dále je možnost vytvoření kondenzátorů reagujících na dotek, což může být využito pro vytvoření ohebných tlačítek. (viz. Obr.25b).[26]



Obr. 25 Senzory na bázi tekutých kovů

Zdroj: *Stretchable and Soft Electronics using Liquid Metals*[online]. Dostupné z:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/adma.201606425>

5 Aplikační využití

V této kapitole se budu věnovat výhodám, které mají Soft roboti a jejich prvky oproti pevným robotům, a díky kterým vidíme velký zájem o toto téma, a poté se budu věnovat firmám, které se v době psaní tohoto článku Soft robotikou zabývají a nabízejí hotové výrobky v tomto odvětví.

5.1 Výhody oproti pevným robotům

Dnešní pevní roboti mají mnoho výhod jako rychlost, zvedání těžkých objektů a přesnost, ale Soft roboti mají několik vlastností, které jsou pro některá využití výhodnější než hlavní výhody pevných robotů.

První z výhod měkkých robotů je snížení počtu částí. S možností ohýbat materiál není potřeba pružin, os a k nim potřebná ložiska a další podpůrné součásti. Jak můžeme vidět na Obr.26 konstrukce pevného efektoru nalevo je složena s několika díly a tvoří stejnou funkci jako mechanismus v pravé části.[28]



Obr. 26 Tvrdý a pevný robotický efektor

Zdroj: *TETRIX® MAX Gripper Kit (W44609)*. [online]. Copyright © 2019 Pitsco, Inc. All rights reserved. [cit. 05.05.2019]. Dostupné z: <https://www.pitsco.com/TETRIX-MAX-Gripper-Kit/&TXredir=1>

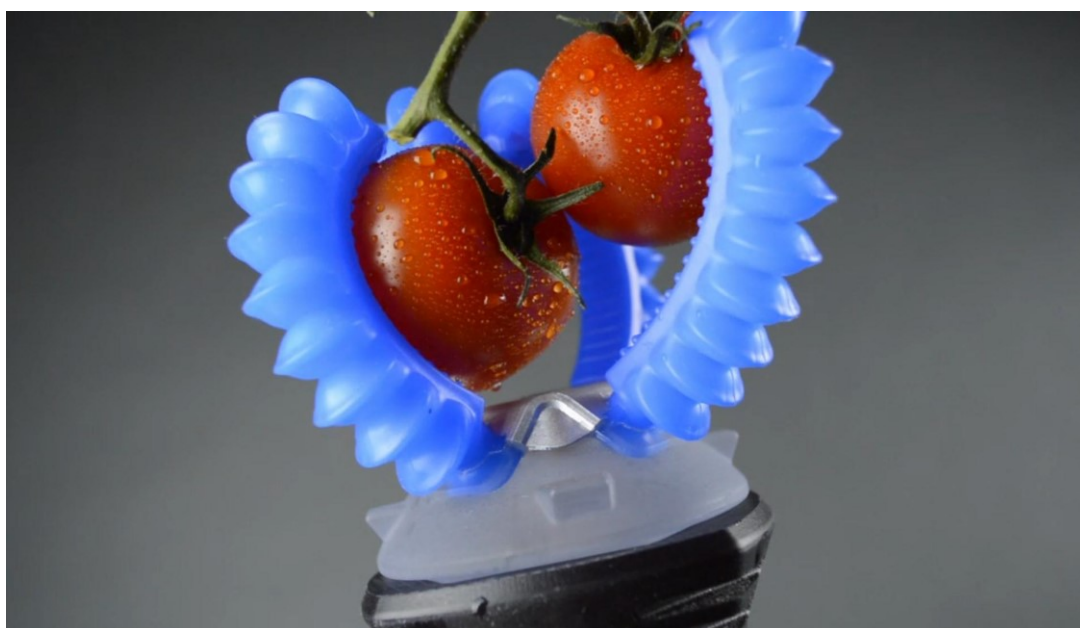
Silicone material enables the 3D printing of soft robotic grippers - Make Parts Fast. 3D Printing and Rapid Manufacturing | Make Parts Fast - Make Parts Fast [online]. Dostupné z: <https://www.makepartsfast.com/silicone-material-enables-the-3d-printing-of-soft-robotic-grippers/>

Jelikož je mnoho částí spojené do jedné, nedochází ke tření, a tedy nedochází k tak vysokému opotřebení, které je spojeno s pevnými roboty. K zabránění tření je u pevných robotů vyžadováno mazání mezi částmi, které zde není potřeba, což dělá roboty vhodné do velice hygienicky náročných prostředí.[2]

Použití měkkých materiálů ovlivňuje hmotnost Soft robotů a manipulátorů. Použité materiály dělají tyto roboty lehčími a kompaktnějšími.

Další výhodou Soft robotů je jejich cena, která je snížena dvěma prvky: menší počet součástí, tedy nižší cena za montáž a za logistiku spojenou s přesunem součástí k finálnímu kompletaci a cena je také snížena materiály, které jsou v soft robotice použity.

Jednou z nejdůležitějších výhod Soft robotů je jejich schopnost přizpůsobit se prostředí, ta jim dává využití převážně v manipulaci s objekty. Schopnost jednoduše manipulovat s různými objekty manipulace bez potřeby komplikovaného řízení nebo bez nutnosti výměny efektoru je jedním z největších nedostatků tvrdé robotiky. Efektory jako na Obr.27 jsou schopny manipulovat s objekty, které nemají pravidelný tvar a jsou křehké. U těchto efektorů není potřeba složitého řízení a přesné umístění efektoru k objektu manipulace (jak je tomu u pevných robotů), toto řízení a umístění je nahrazeno schopností měkkého efektoru se situaci přizpůsobit. [29]



Obr.27 Ukázka schopnosti měkkého efektoru se přizpůsobit objektu manipulace

Zdroj: *Octopus-Inspired Robotic Grippers Receive Huge Funding Boost. Futurism | Science and Technology News and Videos [online]. Dostupné*

z: <https://futurism.com/19772>

5.2 Komerční řešení Soft robotů a měkkých efektorů

Díky relativně čerstvému zájmu o Soft robotiku nejsou na trhu kompletní řešení takovýchto robotů, ale jen roboty nebo efekty se Soft robotickými prvky.

Prvním z těchto řešení jsou efekty od firmy Soft Robotics Inc., které využívají technologii s pneumatických pohonů (viz. kapitola 3.1). Nabízejí efekty (viz. Obr.28) s modulárním počtem chapadel, která jsou zejména výhodná v odvětvích jako je potravinářský a výrobní průmysl, kde je využita jejich schopnost přizpůsobení se objektu manipulace. [30] Tato firma není jediná, která se zabývá touto technologií pro použití při konstrukci efektoru, další takovouto firmou je čínská Suzhou Rochu Robotics Co., [31]



Obr.28 Efektor od firmy Soft Robotics Inc.

Zdroj: *Soft Robotics Inc. [online]. Dostupné z: <https://www.softroboticsinc.com/>*

Společnost Empire robotics zvolila pro fungování svých efektorů technologii Granular jamming (viz. kapitola 5.3). Jejich efekty viz. Obr.29 ve tvaru koulí fungují na principu obklopení objektu manipulace, a poté vpuštění vakua do efektoru, který se přizpůsobí tvaru objektu a pevně ho uchopí. To umožňuje manipulaci s objekty složitých tvarů a různých křehkostí. [32]



Obr.29 Efektor Od společnosti Empire robotics

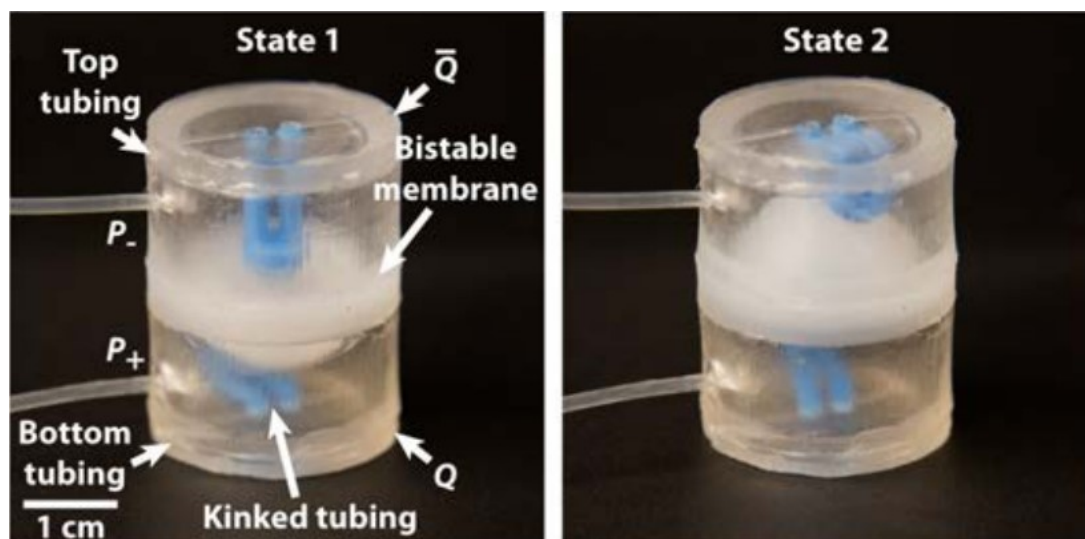
Zdroj: "Jamming" Robot Gripper Gets Official: Article Published in PNAS |
Hizook. Hizook | Robotics News for Academics & Professionals[online]. Dostupné
z: [http://www.hizook.com/blog/2010/10/25/jamming-robot-gripper-gets-official-article-](http://www.hizook.com/blog/2010/10/25/jamming-robot-gripper-gets-official-article-published-pnas)
published-pnas

6 Oblasti vývoje

Mnohé roboty jsou ve fázi prototypů, kde se pro ověření konceptu používají nejdostupnější materiály a nejjednodušší technologická řešení. Tato kapitola se bude zabývat různým odvětvím vědeckého výzkumu a výzev v tomto oboru, která mohou pomoci zlepšení již stávajících Soft robotů a vytváření nových technologií pro nový typy takovýchto robotů.

6.1 Pneumatika a hydraulika

Měkké pneumatické efekторы jsou nejrozšířenějším použitím Soft robotiky. V tomto odvětví je snaha o nahrazení pneumatických komponentů jako ventily a rozvaděče svými měkkými náhradami. Jedním z prvních takových komponent je bistabilní ventil (viz. Obr.30), který využívá bistabilní membrány, která podle potřeby zamezí průchodu tekutiny. Ventil na obrázku pracuje s nižšími tlaky do 15 kPa a přerušení průchodu lze vidět zohnutí modré trubičky.[33]



Obr.30 Bistabilní měkký ventil

Zdroj: Whitesides Research Group [online]. Copyright © [cit. 07.05.2019]. Dostupné z: <https://gmwgroup.harvard.edu/files/gmwgroup/files/1301.pdf>

Další oblastí pro vývoj v této oblasti je Mikrofluidika, která se zabývá prouděním tekutin ve velmi malých rozměrech. Tato technologie by mohla pomoci s přenosem tlakové energie pro malé Soft roboty nebo pro přenos signálu. V oblasti přenosu signálu pomocí Mikrofluidika jsou snahy o vytvoření mikroprocesorů, které by fungovaly na tomto principu, což by dovolilo zcela nové ovládání těchto robotů.[34]

6.2 Chemie a studium materiálů

Jako se ukazuje téma Soft robotiky je úzce spjata se složením materiálu, protože vlastnosti těchto materiálu z části určují pohyb těchto robotů a snižují potřebu pro složitou kontrolu, jak tomu je u pevných robotických zařízení.

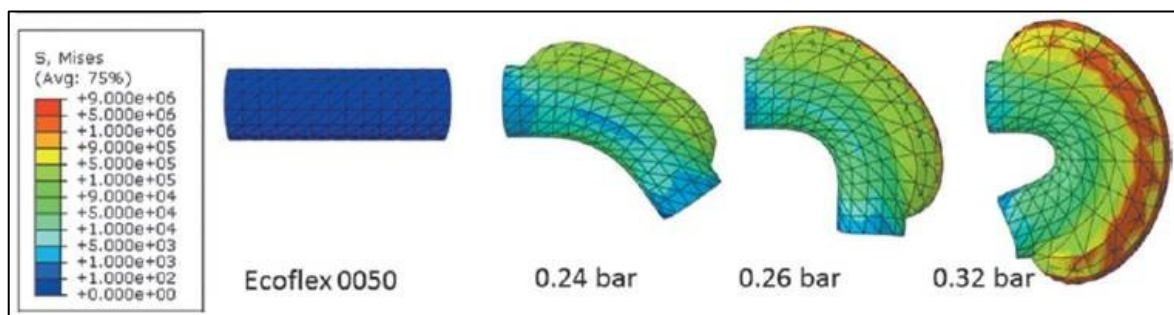
Materiály, které jsou amorfní a jejich vlastnosti jako pružnost nebo poddajnost jsou závislé na směru. Nebo materiály s různým chováním v různých tlakových úrovních by byly přínosem zejména pro pneumatické efekty.[35]

Nové sloučeniny s lepšími vlastnostmi pro pohony jako je větší roztažnost, závislost na teplotě nebo závislost na elektrickém poli, jsou dalšími důležitými tématy pro Soft robotiku. Úzce je s tímto spjata téma senzorů a elektronických prvků, kde jsou výzkumy vedeny směrem k hledání měkkých zdrojů energie a schopnosti některých materiálů tuto energii uchovat.

6.3 Mechanika a simulace

Výhodou Soft robotů je, že nejsou jako tvrdé roboty složené z pár kloubů, které tyto roboty omezují v pohybu. Na rozdíl Soft roboty mají takových kloubů díky svému materiálovému složení nekonečno.

Proto způsoby pro kontrolu robotů jako je inverzní kinematika se ukázaly problémem při modelování a ovládání Soft robotů. Pro omezenou simulaci pohybů se používá metody konečných prvků (viz. Obr.31). Pro simulaci je potřeba použít matematických modelů kontinuálního modelování a v tomto ohledu nebyl vyvinut obecný software pro modelování vysoké škály Soft robotů a jejich částí (různé typy materiálů a jejich chování).



Obr.31 Simulace pneumatického prvku Soft robotu

Zdroj: *Modeling | Soft Robotics Toolkit. Soft Robotics Toolkit [online]. Copyright © 2019*

The President and Fellows of Harvard College [cit. 07.05.2019]. Dostupné

z: <https://softroboticstoolkit.com/mmvs/m modeling>

6.4 Robotika

Vývoj v oblasti robotiky závisí na všech ostatních oblastech, jelikož to jsou stavební prvky Soft robotů. Největší význam je kladen vývoji efektorů a celých Soft robotických manipulátorů, které mají potenciál kolaborativní robotiky s lidmi. Tito roboti jsou díky svým měkkým konstrukcím jednou z možností pro spojení práce člověka robota na jednom pracovišti. Na Obr.32 lze vidět koncept robotu od společnosti Otherlab pneubotics. Robot je celý zkonstruován z pneumatických částí, které jsou nejen tělem tohoto robota, ale i jeho pohony.



Obr.32 Koncept zcela kolaborativního pneumatického robotu

Zdroj: *Big Hero 6 and the Current State of the Art in Soft Inflatable Robots* | Hizook. Hizook | *Robotics News for Academics & Professionals*[online]. Dostupné z: <http://www.hizook.com/blog/2014/11/12/big-hero-6-soft-inflatable-robot-meets-big-screen>

Další specifický zájem robotiky je použití Soft robotů ve vesmíru. Jejich malé rozměry a nízké hmotnosti dělají méně nákladné dostat tyto roboty na oběžnou dráhu a stav bez tíže dovoluje vyvíjet roboty bez pevných podpůrných konstrukcí.[36] Na oběžné dráze poté mohou být tyto roboty využity pro sběr vesmírného odpadu.

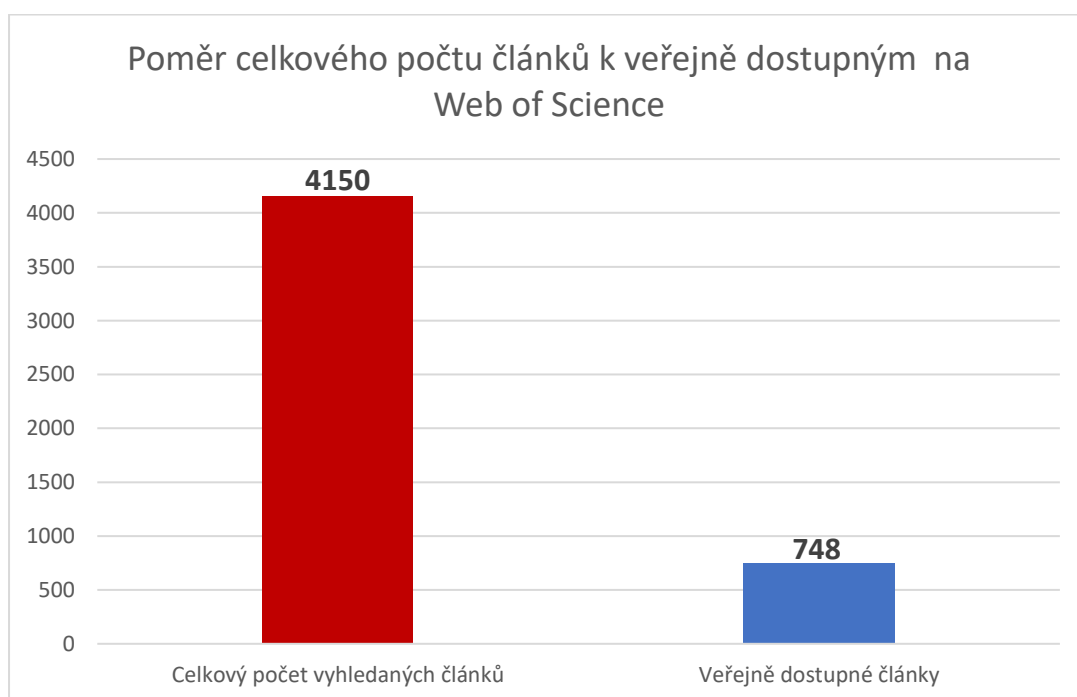
7 Internetové databáze

Pro vyhledání článků a informací pro tuto bakalářskou práci jsem využil internetových databází Web of Science (WoS) a Scopus. Tyto databáze jsou používány pro vyhledávání abstraktů a citací vědeckých článků univerzit a vědeckých periodik.

7.1 Web of Science

Web of science jako citační databáze obsahu 10 000 celosvětových odborných časopisů a 110 000 konferenčních příspěvků.[37]

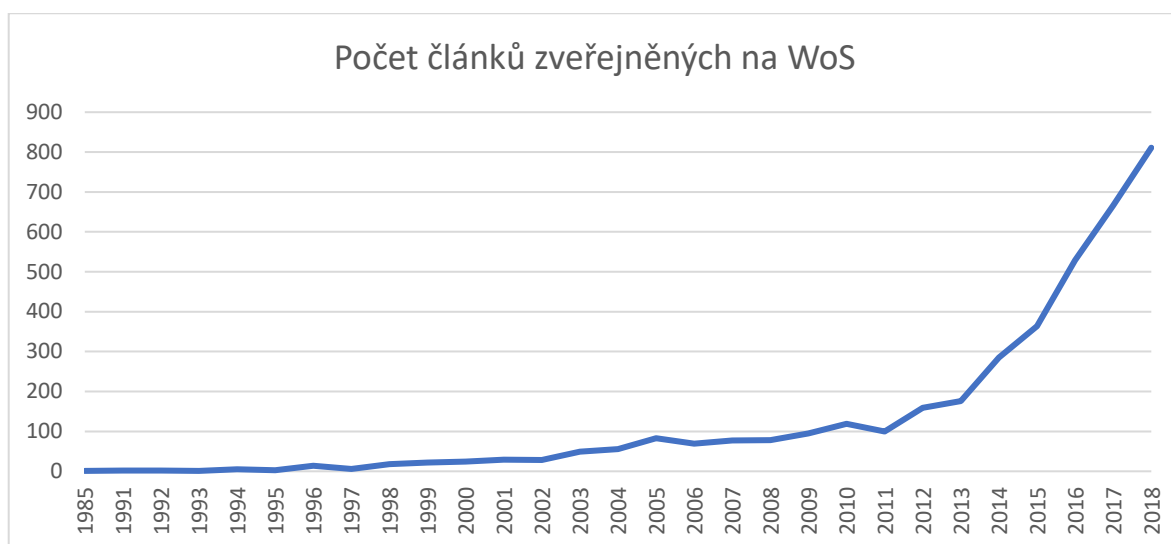
Hledal jsem články obsahující pojem „Soft robotics.“ Z 4150 vyhledaných výsledků obsahovalo nejen články hledané problematiky, ale také články medicínské, kde se slova jako „Soft“ a „robotics“ objevují zvlášť a nejsou tedy předmětem této práce. Na Graf 1 lze vidět poměr vyhledaných článků ke článkům s otevřeným přístupem, ze kterých jsem pro tuto práci čerpal.



Graf 1 - Poměr celkového počtu článků k veřejně dostupným článkům na WoS
(k květnu 2019)

Zdroj: Web of Science [online] dostupné z: <https://apps.webofknowledge.com>

Na Graf 2 můžeme vidět počet uveřejněných článků na WoS s předem popsányi vyhledávacími kritérii. Články nezahrnují jen Soft robotiku jako obor, ale také články, které se zabývaly použitím měkkých prvků v robotice, což byly předchůdci, a první ukázky výhod při použití poddajných materiálů. Na grafu lze vidět vzrůstající zájem o toto téma.



Graf 2 – Počet ročně uveřejněných článků týkající se Soft robotiky (do konce roku 2018)

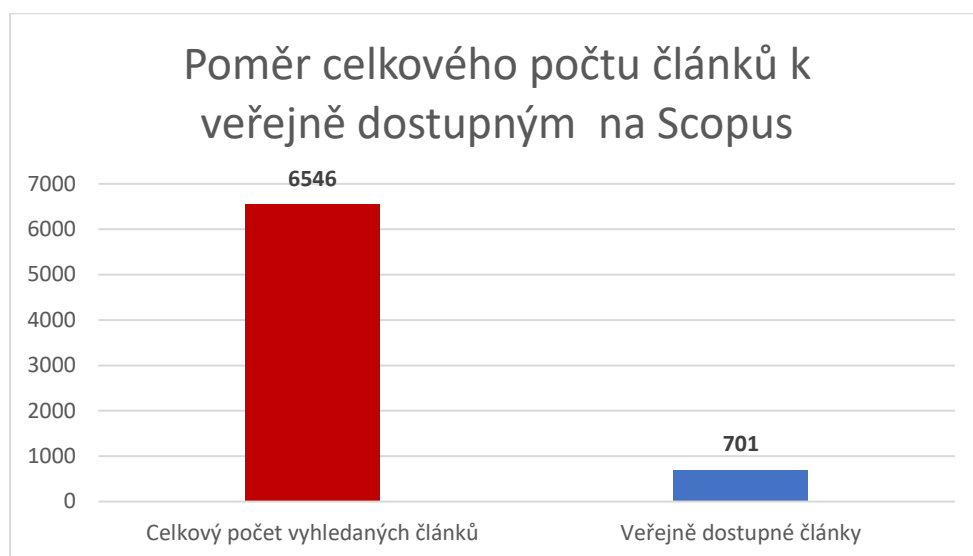
Zdroj: Web of Science [online] dostupné z: <https://apps.webofknowledge.com>

Jedna z největších možností pro uveřejňování článků jsou konference IEEE. IEEE je nezisková organizace s celým názvem *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, která se zabývá vzestupem technologií týkajících se elektrotechniky.[38] Organizace pořádá pravidelné konference zaměřené na konkrétní témata. V průběhu let bylo například na *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Mezinárodní konference robotiky a automatizace) uveřejněno 160 článků týkající se Soft robotů - dále na *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (Mezinárodní konference Inteligentních robotů a systémů) bylo uveřejněno 134 článků.[39]

7.2 Scopus

Databáze Scopus obsahuje téměř 20 500 recenzovaných časopisů a má záznamy od více než 5000 vydavatelů po celém světě. [40]

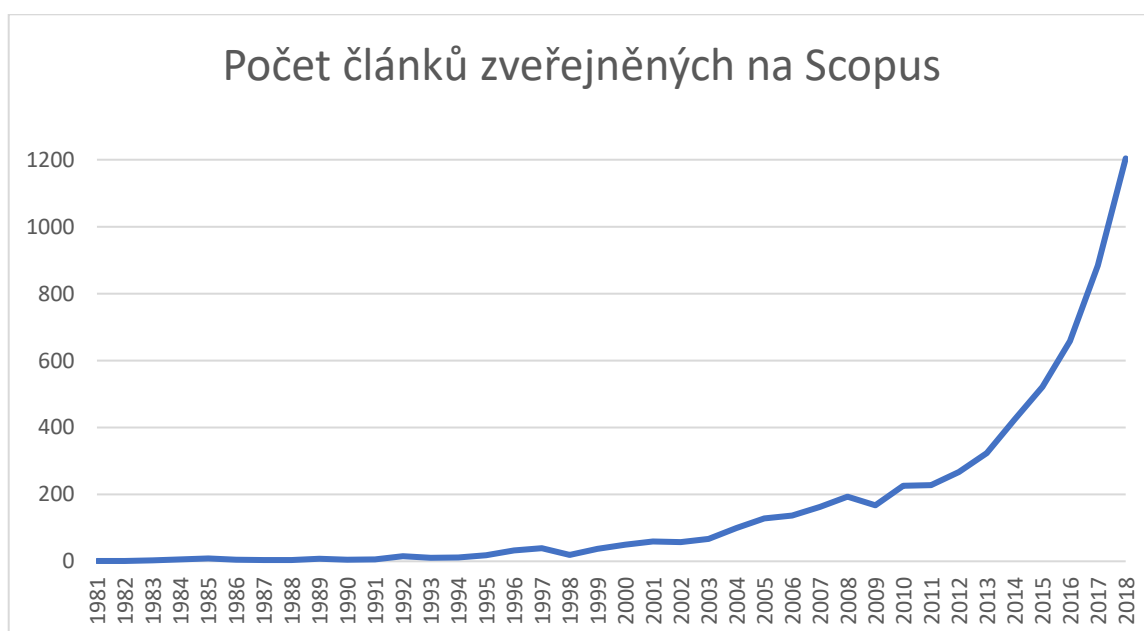
Pro vyhledaný pojem „Soft robotics“ Scopus našel 6546 hledané problematiky se stejnými nežádoucími články jako o Web of Science. Oproti WoS obsahuje Scopus větší počet článků, ale s menším počtem článků, které pro mě byly dostupné. Graf 3 zobrazuje poměr celkového počtu článků k dostupnému počtu článků.



Graf 3 - Poměr celkového počtu článků k veřejně dostupným článkům na Scopus
(k květnu 2019)

Zdroj: Scopus [online] dostupné z: <https://scopus.com>

Na Graf 4 můžeme vidět počet uveřejněných článků na Scopus s předem popsanými vyhledávacími kritérii. Články nezahrnují jen Soft robotiku jako obor, ale také články, které se zabývaly použitím měkkých prvků v robotice, což byly předchůdci a první ukázky výhod při použití poddajných materiálů. Graf 4 má podobný trend jako Graf 2 je to následkem toho, že většina článku je uveřejněna na obě databáze.



Graf 4 – Počet ročně uveřejněných článků týkající se Soft robotiky (do konce roku 2018)

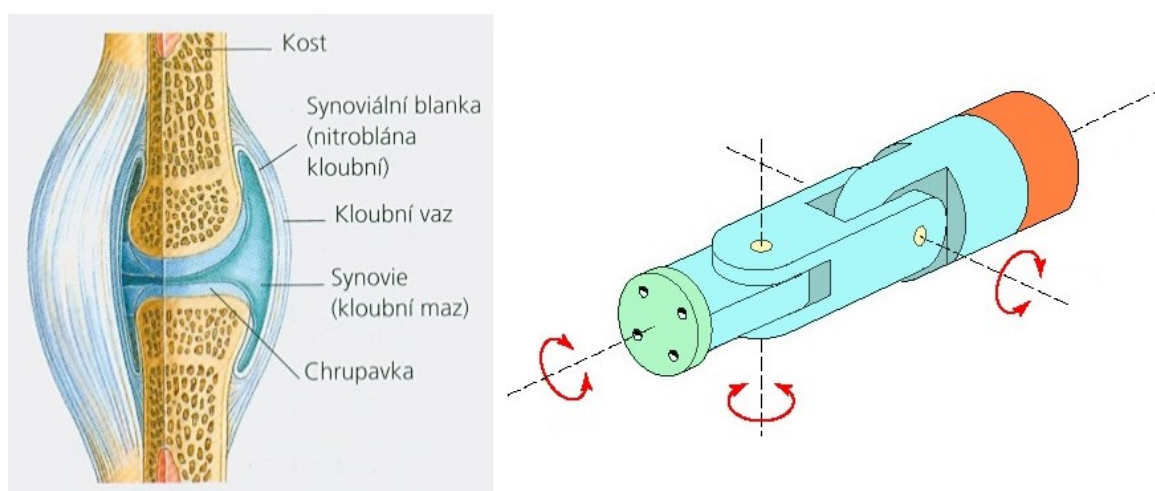
Zdroj: Scopus [online] dostupné z: <https://scopus.com>

8 Nové oblasti pro vývoj a aplikaci Soft robotiky

Soft robotika jako nová část robotiky se zabývá jen malou částí robotiky a má mnoho oblastí, kde nebyla využita a mohla být výhodným řešením. V této kapitole se budu zabývat novými oblastmi, ve kterých by mohla být Soft robotika využita, a jejich výhodou oproti konvekčním řešením. Na specifickém řešení ukáži výhody Soft robotických prvků a jaké další možnosti využití z tohoto řešení vyplývají.

8.1 Soft robotické klouby

V těle živočichů (např. člověka) jsou klouby užity nejen pro stupně volnosti těla, ale také tlumí pohyby a jsou pružné. Tyto vlastnosti dovolují živočichům se přizpůsobit se prostředí a ustát nárazy při pohybu. Robotické klouby bývají obecně pevné a nepružné, což jim umožňuje pracovat s obrovskou přesností a rychlostí oproti živočichům, ale přizpůsobení se prostředí je problematické a vyžaduje zakomponování mnoha senzorů a výpočetní techniky. Na Obr.33 lze vidět robotický kloub a lidský, který se skládá z pevných částí, ale také měkkých (vyznačeny modrou barvou), které umožňují kloubu pružný pohyb.



Obr.33 Porovnání lidského a robotického kloubu

Zdroj: *O KLOUBECH V LIDSKÉM TĚLE*. [online].

Dostupné z: <https://www.orling.cz/cs/clanky/o-artroze-a-lidech/kosti-a-klouby/o-kloubech-v-lidskem-tele.html>

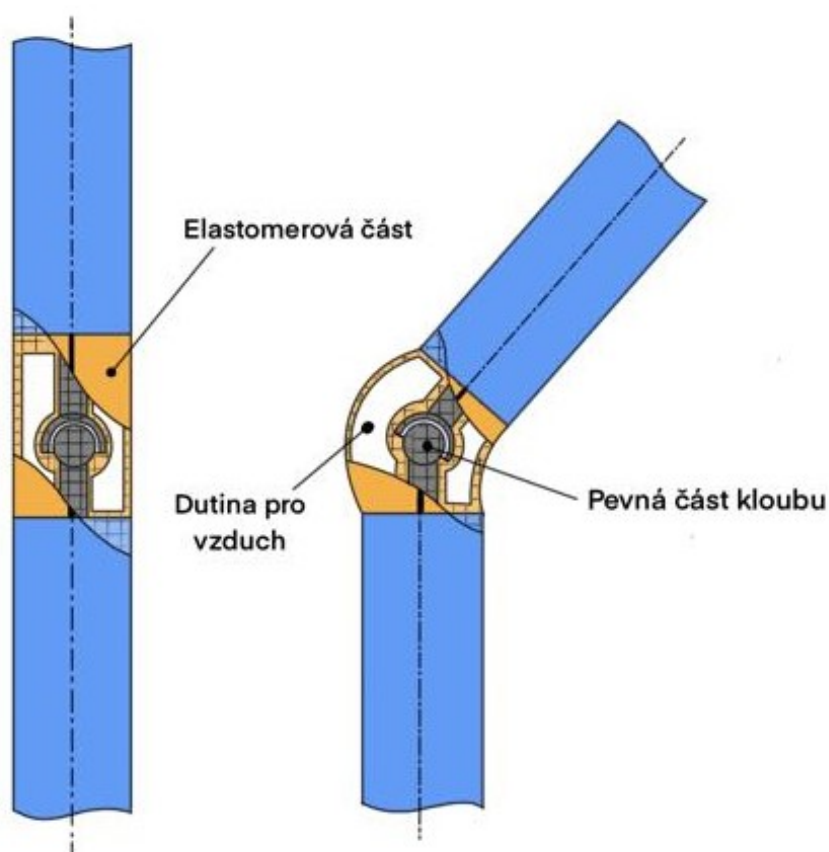
. NPTEL [online]. Dostupné z: <https://nptel.ac.in/courses/112103174/module7/lec5/3.html>

Lidský kloub se skládá z pevných částí a měkkých (poddajných), které jsou možné nahradit Soft robotickými prvky. Z přírody můžeme vidět, že spojení měkkých a pevných částí může být výhodné, a tedy spojení prvků Soft robotiky a pevných prvků by mohlo být v některých aplikacích výhodným řešením. Pevné části by robotickým prvkům zajišťovaly podporu (jako je kostra pro živé organismy) své vlastní váhy a oproti vnějším silám a měkké

části by dovoľovaly robotům přizpůsobení se prostředí, a tedy potřebnou pružnost bez velkého množství složitých senzorů.

Na Obr.34 lze vidět koncept poddajného kloubu. Kloub se skládá z pevné části, která určuje rozsah pohybů. Dále se kloub skládá z SPA (viz. kapitola 5.1) pohonů, která jsou rozmístěny rovnoměrně okolo osy kloubu (v narovnaném stavu). S rostoucím počtem SPAs kolem osy se zvyšuje přesnost ohybu kloubu, ale kontrola vzhledem k vyššímu počtu pohonů se komplikuje.

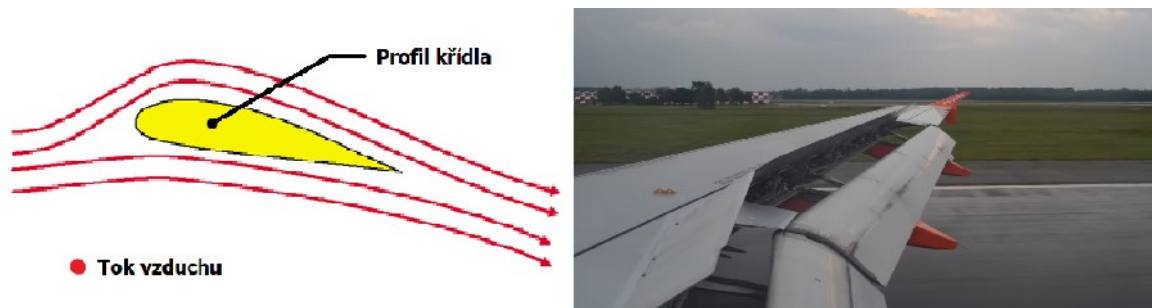
Tento koncept kloubu může mít využití např. v servisní robotice pro pohybovou nástavbu robotu, která by získala schopnost pohybu na velmi členitém terénu, nebo jako akční nástavba robotu pro manipulaci s objekty nízké hmotnosti vzhledem k nižší únosnosti kloubu z důvodu použití měkkých a poddajných materiálů.



Obr.34 Koncept poddajného kloubu

8.2 Soft robotické křídlo

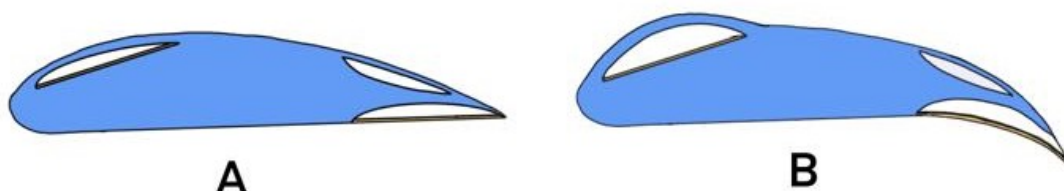
Jedním z hlavních prvků pro let letadla ve vzduchu je křídlo. Na Obr.35 lze vlevo vidět základní profil křídla. Tento tvar zajišťuje, že síly při proděních vzduchu jsou větší na spodní části křídla, a tedy nadnáší celou konstrukci letadla. Změnou geometrie tohoto základního tvaru měníme rychlost, směr a vzestup letadel. Změna geometrie v praxi je dosažena pohyblivými konstrukcemi křídel, které podle potřeby mění svůj tvar. [42]



Obr.35 Základní profil křídla a využití v konstrukci křídla letadla

Zdroj: *FlightSim výuka - Lekce 4: Pomalý let. krepelka.com - HOME* [online]. Dostupné z: <http://krepelka.com/FSX/1student/4.htm>

Na Obr.36 je koncept křídla v řezu využívající SPAs. Křídlo je celé zkonstruováno z měkkých elastomerů s komorami pro vzduch, které po vystavení tlaku zvětší svůj objem a tím změni tvar křídla a tím jeho vlastnosti. Jelikož má na povrchu křídlo ucelenou geometrii, je aerodynamičtější, tedy zlepšuje efektivitu a možnost větší volnosti v počtu různých tvarů geometrie dává křídům lepší ovládací vlastnosti. Zásoba vzduchu pro pohyb komor je uložena přímo v komorách pro pohyb vzhledem k tomu, že pro určité pohyby musí být vzduch z jedné komory přesunut do jiné (tedy by byl vytvořen uzavřený hydraulický obvod).



Obr.36 Křídlo s poddajným tvarem (A – stav s komorami bez tlaku, B – stav s komorami pod tlakem)

Na Obr.36 je ukázán koncept používající SPAs pohony, které mohou být nahrazeny DEAPs pohony (viz. kapitola 5.2). Konstrukce vytvořena za pomoci DEAPs pohonů by nabývala menších rozměrů vzhledem k nutnosti použití komor pro pohony typu SPAs. Pro konečnou konstrukci by mohl být využit jeden typ pohonu pro všechny pohyby, nebo kombinace různých pohonů, která by zajistila optimální pohyb pro určenou operaci.

Tato konstrukce ukazuje možnost změnit pevné konstrukce na měkké a poddajné, a tedy využitelné v Soft robotice. Změna konstrukce z pevné na poddajnou ale mění použití. Takto měkká konstrukce se svou měkkostí ztrácí schopnost být vystavená velkým silám bez poškození a změny tvaru, což zabraňuje jejímu požití v leteckém průmyslu. Na druhou stranu výhody jako nízká hmotnost, nepropustnost(vodotěsnost), poddajnost dávají takovéto konstrukci možnost být využita v podvodní robotice. Tento typ křídel být použit pro vytvoření rychlých, vysoce manévrovatelných podvodních robotů se zcela měkkými těly.

9 Závěr

Problematiku Soft robotiky jsem v prvních kapitolách rozdělil do dvou nejvíce zkoumaných odvětví, což jsou pohony a elektrotechnika. Nejvíce zastoupený způsob pohybu a pohánění těchto robotů jsou měkké pneumatické pohony, které využívají tlaku a komor, které po vystavení tlaku způsobí pohyb. Dalšími pohony jsou ty využívající elektroaktivní polymery, které se po vystavení elektrickému proudu roztahují.

Důležitou složkou robotů je elektronika a pro toto odvětví robotiky musí být elektronika schopna se spolehlivě ohýbat s materiálem. Této vlastnosti je dosaženo zmenšením rozměrů součástí, které tím získají na ohebnosti, nebo použitím tekutých kovů, které mají nejen velkou ohebnost, ale jsou schopny sebe hojení při poškození.

Aplikace Soft robotiky je v současné době zaměřena především na efekty, které se svou schopností přizpůsobit se objektu manipulace jsou nasazovány do odvětví jako potravinářský průmysl, kde historicky tvrdé efekty zaostávaly. Nové aplikace pro Soft robotiku se dají očekávat hlavně v oblastech, kde je nutnost pro roboty s vysokou mírou přizpůsobivosti (spíše než přesnosti) nebo schopností vykonávat velkou škálu různorodých úkonů.

Ve výzkumu Soft robotiky jsou dvě nejdůležitější odvětví. Prvním z nich je chemie a materiály, jelikož se materiály starají o pohyb i ochranu robotů a mají za následek snížení nutnosti kontroly těchto robotů díky svým vlastnostem se kontrolovat samy (přizpůsobení prostředí poddajností), jsou jednou z nejdůležitějších částí těchto nových robotů. Druhým odvětvím je vytvoření simulačního softwaru pro měkké součásti, které na rozdíl od pevných robotů s několika ohebnými klouby mají takovýchto kloubů nekonečno.

Seznam použitých pramenů

- [1] BAO, Guanjun, Hui FANG, Lingfeng CHEN, Yuehua WAN, Fang XU, Qinghua YANG a Libin ZHANG. Soft Robotics: Academic Insights and Perspectives Through Bibliometric Analysis. *Soft Robotics*. 2018, 1812, **5**(3), 229-241. DOI: 10.1089/soro.2017.0135. ISSN 2169-5172. Dostupné také z: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/soro.2017.0135>
- [2] WHITESIDES, George M., Hui FANG, Lingfeng CHEN, Yuehua WAN, Fang XU, Qinghua YANG a Libin ZHANG. Soft Robotics: Academic Insights and Perspectives Through Bibliometric Analysis. *Angewandte Chemie International Edition*. 2018, 1812, **57**(16), 4258-4273. DOI: 10.1002/anie.201800907. ISSN 14337851. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/anie.201800907>
- [3] WHITESIDES, G. M., Hui FANG, Lingfeng CHEN, Yuehua WAN, Fang XU, Qinghua YANG a Libin ZHANG. Bioinspiration: something for everyone. *Interface Focus*. 2015, 1812, **5**(4), 20150031-20150031. DOI: 10.1098/rsfs.2015.0031. ISSN 2042-8898. Dostupné také z: <http://rsfs.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsfs.2015.0031>
- [4] McKibbenův pneumatický sval v robotice. In: [online]. Dostupné z: <https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2003-2-62.pdf>
- [5] Pneumatic Artificial Muscles. *Softroboticstoolkit* [online]. Harvard University and Trinity College Dublin, 2018 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://softroboticstoolkit.com/book/pneumatic-artificial-muscles>
- [6] WANG, Liyu, Surya G. NURZAMAN, Fumiya IIDA a Stephen BOYD. Soft-Material Robotics. *Foundations and Trends in Robotics*. 2014, **5**(3), 191-259. DOI: 10.1561/23000000055. ISSN 1935-8253. Dostupné také z: <http://www.nowpublishers.com/article/Details/ROB-055>
- [7] BAO, Guanjun, Hui FANG, Lingfeng CHEN, Yuehua WAN, Fang XU, Qinghua YANG a Libin ZHANG. Soft Robotics: Academic Insights and Perspectives Through Bibliometric Analysis. *Soft Robotics*. 2018, **5**(3), 229-241. DOI: 10.1089/soro.2017.0135. ISSN 2169-5172. Dostupné také z: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/soro.2017.0135>

- [8] HUGHES, Josie, Utku CULHA, Fabio GIARDINA, Fabian GUENTHER, Andre ROSENDO, Fumiya IIDA a Libin ZHANG. Soft Manipulators and Grippers: A Review. *Frontiers in Robotics and AI*. 2016, **3**(3), 229-241. DOI: 10.3389/frobt.2016.00069. ISSN 2296-9144. Dostupné také z: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/frobt.2016.00069/full>

- [9] MOSADEGH, Bobak, Panagiotis POLYGERINOS, Christoph KEPLINGER, et al. Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly: A Review. *Advanced Functional Materials*. 2014, **24**(15), 2163-2170. DOI: 10.1002/adfm.201303288. ISSN 1616301X. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adfm.201303288>

- [10] [MARCHESE, Andrew D., Robert K. KATZSCHMANN, Daniela RUS, et al. A Recipe for Soft Fluidic Elastomer Robots: A Review. *Soft Robotics*. 2015, **2**(1), 7-25. DOI: 10.1089/soro.2014.0022. ISSN 2169-5172. Dostupné také z: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/soro.2014.0022>

- [11] THUMMALA, Prasanth, Lina HUANG, Zhe ZHANG, et al. Analysis of Dielectric Electro Active Polymer actuator and its high voltage driving circuits: A Review. *2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*. IEEE, 2012, 2012, **2**(1), 458-461. DOI: 10.1109/IPMHVC.2012.6518779. ISBN 978-1-4673-1225-7. ISSN 2169-5172. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6518779/>

- [12] KOFOD, Guggi, Werner WIRGES, Mika PAAJANEN, et al. Energy minimization for self-organized structure formation and actuation: A Review. *Applied Physics Letters*. IEEE, 2007, 2012, **90**(8), 458-461. DOI: 10.1063/1.2695785. ISBN 978-1-4673-1225-7. ISSN 0003-6951. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.2695785>

- [13] Electrodehesion. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrodehesion>

- [14] SHINTAKE, Jun, Samuel ROSSET, Bryan SCHUBERT, et al. Versatile Soft Grippers with Intrinsic Electrodehesion Based on Multifunctional Polymer Actuators: A Review. *Advanced Materials*. IEEE, 2016, 2012, **28**(2), 231-238. DOI: 10.1002/adma.201504264. ISBN 978-1-4673-1225-7. ISSN 09359648. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201504264>

- [15] JIANG, Allen, Tomaso ASTE, Prokar DASGUPTA, et al. Granular Jamming With Hydraulic Control: A Review. *Volume 6A: 37th Mechanisms and Robotics Conference*. ASME, 2013, 2013-8-4, **28**(2), V06AT07A021-. DOI: 10.1115/DETC2013-12213. ISBN 978-0-7918-5593-5. ISSN 09359648. Dostupné také z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/DETC2013-12213>
- [16] JIANG, Allen, Tommaso RANZANI, Giada GERBONI, et al. Robotic Granular Jamming: Does the Membrane Matter?. *Soft Robotics*. ASME, 2014, 2013-8-4, **1**(3), 192-201. DOI: 10.1089/soro.2014.0002. ISBN 978-0-7918-5593-5. ISSN 2169-5172. Dostupné také z: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/soro.2014.0002>
- [17] HARTL, D J, D C LAGOUDAS, Giada GERBONI, et al. Aerospace applications of shape memory alloys: Does the Membrane Matter?. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. ASME, 2007, 2013-8-4, **221**(4), 535-552. DOI: 10.1243/09544100JAERO211. ISBN 978-0-7918-5593-5. ISSN 0954-4100. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1243/09544100JAERO211>
- [18] CIANCHETTI, Matteo, Alessia LICOFFONTE, Maurizio FOLLADOR, et al. Bioinspired Soft Actuation System Using Shape Memory Alloys: Does the Membrane Matter?. *Actuators*. ASME, 2014, 2013-8-4, **3**(3), 226-244. DOI: 10.3390/act3030226. ISBN 978-0-7918-5593-5. ISSN 2076-0825. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2076-0825/3/3/226>
- [19] SANGOK SEOK, Matteo, Cagdas D ONAL, Robert WOOD, et al. Peristaltic locomotion with antagonistic actuators in soft robotics: Does the Membrane Matter?. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2010, 2010, **3**(3), 1228-1233. DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509542. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 2076-0825. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5509542/>

- [20] HAWKES, Elliot W., Laura H. BLUMENSCHN, Joseph D. GREER, et al. A soft robot that navigates its environment through growth: Does the Membrane Matter?. *Science Robotics*. IEEE, 2017, 2010, **2**(8), 1228-1233. DOI: 10.1126/scirobotics.aan3028. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 2470-9476. Dostupné také z: <http://robotics.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/scirobotics.aan3028>
- [21] XU, Tianqi, Jiachen ZHANG, Mohammad SALEHIZADEH, et al. Millimeter-scale flexible robots with programmable three-dimensional magnetization and motions: Does the Membrane Matter?. *Science Robotics*. IEEE, 2019, 2010, **4**(29), 1228-1233. DOI: 10.1126/scirobotics.aav4494. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 2470-9476. Dostupné také z: <http://robotics.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/scirobotics.aav4494>
- [22] KENRY, Tianqi, Joo Chuan YEO, Chwee Teck LIM, et al. Emerging flexible and wearable physical sensing platforms for healthcare and biomedical applications: Does the Membrane Matter?. *Science Robotics*. IEEE, 2016, 2010, **2**(1), 1228-1233. DOI: 10.1038/micronano.2016.43. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 2055-7434. Dostupné také z: <http://www.nature.com/articles/micronano201643>
- [23] BAUER, Siegfried, Simona BAUER-GOGONEA, Ingrid GRAZ, et al. 25th Anniversary Article: A Soft Future. *Advanced Materials*. IEEE, 2014, 2010, **26**(1), 149-162. DOI: 10.1002/adma.201303349. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 09359648. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201303349>
- [24] DICKEY, Michael D., Simona BAUER-GOGONEA, Ingrid GRAZ, et al. Stretchable and Soft Electronics using Liquid Metals: A Soft Future. *Advanced Materials*. IEEE, 2017, 2010, **29**(27), 149-162. DOI: 10.1002/adma.201606425. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 09359648. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201606425>
- [25] MAKAROV, Denys, Michael MELZER, Daniil KARNAUSHENKO, et al. Shapeable magnetoelectronics: A Soft Future. *Applied Physics Reviews*. IEEE, 2016, 2010, **3**(1), 149-162. DOI: 10.1063/1.4938497. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 1931-9401. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4938497>

- [26] DICKEY, Michael D., Michael MELZER, Daniil KARNAUSHENKO, et al. Stretchable and Soft Electronics using Liquid Metals: A Soft Future. *Advanced Materials*. IEEE, 2017, 2010, **29**(27), 149-162. DOI: 10.1002/adma.201606425. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 09359648. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201606425>

- [27] Memristor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Memristor>

- [28] Why Machines That Bend Are Better In: *Youtube* [online]. 12.03.2016 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=97t7Xj_iBv0&t=446s

- [29] CAMPBELL, Sarah, Michael MELZER, Daniil KARNAUSHENKO, et al. The Robotics Revolution Will Be Soft: Soft Robotics Proliferate-Along with Their Sources of Inspiration. *IEEE Pulse*. IEEE, 2018, 2010, **9**(3), 19-24. DOI: 10.1109/MPUL.2018.2814240. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 2154-2287. Dostupné také z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8358090/>

- [30] *Soft Robotics, Inc.* [online]. Bedford, Massachusetts [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.softroboticsinc.com/>

- [31] *Suzhou Rochu Robotics Co.* [online]. Zhangjiagang City, Jiangsu Province, China: beian.miit [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.rochu.com>

- [32] *Empire Robotics* [online]. Chicago,USA: WordPress [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.empirerobotics.com/>

- [33] ROTHEMUND, Philipp, Alar AINLA, Lee BELDING, et al. A soft, bistable valve for autonomous control of soft actuators: Soft Robotics Proliferate-Along with Their Sources of Inspiration. *Science Robotics*. IEEE, 2018, 2010, **3**(16), 19-24. DOI: 10.1126/scirobotics.aar7986. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 2470-9476. Dostupné také z: <http://robotics.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/scirobotics.aar7986>

- [34] RHEE, Minsoung, Mark A. BURNS, Lee BELDING, et al. Microfluidic pneumatic logic circuits and digital pneumatic microprocessors for integrated microfluidic systems: Soft Robotics Proliferate-Along with Their Sources of Inspiration. *Lab on a Chip*. IEEE, 2009, 2010, **9**(21), 19-24. DOI: 10.1039/b904354c. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 1473-0197. Dostupné také z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=b904354c>
- [35] ILIEVSKI, Filip, Aaron D. MAZZEO, Robert F. SHEPHERD, et al. Soft Robotics for Chemists: Soft Robotics Proliferate-Along with Their Sources of Inspiration. *Angewandte Chemie International Edition*. IEEE, 2011, 2010, **50**(8), 1890-1895. DOI: 10.1002/anie.201006464. ISBN 978-1-4244-5038-1. ISSN 14337851. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/anie.201006464>
- [36] [36] TRIMMER, Barry & LIN, Huai-Ti & , Leisk. (2013). Soft Robots in Space: A Perspective for Soft Robotics. *Acta Futura*. 6. 69-79. 10.2420/AF06.2013.69. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/255709006_Soft_Robots_in_Space_A_Perspective_for_Soft_Robotics
- [37] Web of Science. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Web_of_Science
- [38] IEEE. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/IEEE>
- [39] *Web of Science* [online]. United States: Clarivate Analytics [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.webofknowledge.com/>
- [40] [40] Scopus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Scopus_\(datab%C3%A1ze\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Scopus_(datab%C3%A1ze))
- [41] Airplanes. *Explain that stuff* [online]. United States, 2018, Duben 17, 2018 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/howplaneswork.html>

Seznam příloh

Přiložený disk:

Příloha A: Soubor obsahující seznamy článků a odkazů